

Université de la Réunion

Habilitation à diriger des recherches

Discipline : Biologie des organismes – Agronomie (CNU 68)

RELATION AGRICULTURE-ELEVAGE

Combinaison d'approches analytiques et systémiques

Jean-Marie PAILLAT

UPR CIRAD Recyclage et Risque, Station de la Bretagne,
BP 20, 97408 Saint-Denis Messagerie Cedex 9, Ile de la Réunion

Soutenue le mardi 15 mars 2011 devant le jury composé de :

Jean BOIFFIN, Directeur de recherches, INRA (rapporteur)

Rémy COURDIER, Professeur, Université de la Réunion (président du jury)

Bernard FAYE, Directeur de recherches HDR, INRA-CIRAD (rapporteur)

François GUERRIN, Ingénieur de recherches HDR, INRA (directeur)

Philippe LETERME, Professeur, Agrocampus Ouest (examineur)

Jean-Philippe STEYER, Directeur de recherches HDR, INRA (rapporteur)

Table des matières

| | |
|--|-----------|
| REMERCIEMENTS | 5 |
| I PRESENTATION DU CANDIDAT | 7 |
| I.1. RESUME DU PARCOURS PROFESSIONNEL | 7 |
| I.2. CURRICULUM VITAE DETAILLE | 9 |
| I.3. LISTE DES PUBLICATIONS | 14 |
| I.3.1. <i>Articles de périodiques</i> | 14 |
| I.3.2. <i>Ouvrages et chapitres d'ouvrages</i> | 16 |
| I.3.3. <i>Communications</i> | 17 |
| I.3.4. <i>Rapports</i> | 23 |
| I.3.5. <i>Autres documents</i> | 25 |
| I.4. TRAVAUX ENCADRES | 28 |
| I.4.1. <i>Thèses de doctorat</i> | 28 |
| I.4.2. <i>Mémoires de stages niveau M2 : ingénieurs, DAA, DEA, DESS</i> | 29 |
| I.4.3. <i>Mémoires de maîtrise niveau M1</i> | 30 |
| I.5. POSITIONNEMENT SCIENTIFIQUE | 31 |
| I.5.1. <i>Contexte et historique des recherches</i> | 31 |
| I.5.2. <i>Objectifs de recherche</i> | 32 |
| II. MEMOIRE DES TRAVAUX DE RECHERCHE | 35 |
| II.1. INTRODUCTION : DE L'APPROCHE PAR LES TECHNIQUES A L'ANALYSE SYSTEMIQUE DES SYSTEMES D'ELEVAGE ET A LEUR MODELISATION POUR EN EVALUER LA PERFORMANCE AGRONOMIQUE ET ENVIRONNEMENTALE | 35 |
| II.2. LA GESTION DES STOCKS : INTERFACE ENTRE AGRICULTURE ET ELEVAGE | 38 |
| II.2.1. <i>Gestion des systèmes fourragers et conservation de la biomasse</i> | 38 |
| II.2.1.1. Conservation des fourrages tempérés et tropicaux en balles enrubannées | 38 |
| II.2.1.2. Récolte et traitement de la paille de canne à sucre | 41 |
| II.2.1.3. Typologie des systèmes fourragers et analyse des pratiques d'affouragement | 44 |
| II.2.2. <i>Gestion et transformation des effluents d'élevage</i> | 47 |
| II.2.2.1. Des typologies pour raisonner les modes de gestion des effluents d'élevage et le risque environnemental | 47 |
| II.2.2.2. Construction d'un modèle d'action pour la gestion des matières organiques | 55 |
| II.2.2.3. Volatilisation de l'azote à l'épandage | 58 |
| II.2.2.4. Transformations hors-sol des effluents : émissions gazeuses lors du compostage | 61 |
| II.3. MODELISATION DE LA GESTION DES FLUX DE MATIERES AUX NIVEAUX DE L'EXPLOITATION D'ELEVAGE ET DU TERRITOIRE ET EVALUATION ENVIRONNEMENTALE | 65 |
| II.3.1. <i>Modèles de simulation de la gestion des effluents d'élevage</i> | 65 |
| II.3.2. <i>Modèles de simulation des flux de nutriments au niveau de l'exploitation d'élevage</i> | 70 |
| II.3.3. <i>Articulation des modèles de simulation avec l'évaluation environnementale multicritères</i> | 79 |

| | | |
|--|---|------------|
| III. | PERSPECTIVES DE RECHERCHE..... | 87 |
| III.1. | PROBLEMATIQUE ET OBJECTIFS DE RECHERCHE | 87 |
| III.2. | THEMES DE RECHERCHE ENVISAGES | 88 |
| III.2.1. | <i>Couplage entre règles de gestion et modèles biophysiques simplifiés.....</i> | 89 |
| III.2.2. | <i>Méthodologie de simulation avec les modèles de gestion des PRO.....</i> | 89 |
| III.2.3. | <i>Articulation avec les approches statiques d'évaluation</i> | 90 |
| III.2.4. | <i>Validation des modèles par l'usage.....</i> | 91 |
| III.2.5. | <i>Modélisation des émissions gazeuses et des caractéristiques des coproduits lors de la transformation des PRO</i> | 91 |
| III.2.6. | <i>Quantification des émissions gazeuses lors de la gestion hors sol des PRO</i> | 92 |
| III.3. | POSITIONNEMENT SCIENTIFIQUE DANS MON UNITE DE RECHERCHE ET LES PROJETS EN COURS | 93 |
| | <i>Projet ANR-08-STRA-15 ISARD (2009-2012)</i> | 94 |
| | <i>Projet Ministère de l'agriculture CasDar GIROVAR (2011-2013)</i> | 95 |
| | <i>Programme Etat-Région Réunion-UE PILMO (2011-2013).....</i> | 95 |
| | <i>Pôle d'excellence « Impacts et services environnementaux des activités agricoles en milieu tropical ».....</i> | 96 |
| BIBLIOGRAPHIE | | 99 |
| INDEX DES SIGLES, ACRONYMES ET ABREVIATIONS | | 105 |
| LISTE DES TABLEAUX ET FIGURES | | 107 |
| ANNEXES : SELECTION DE PUBLICATIONS | | 109 |

Remerciements

Ce mémoire d'habilitation à diriger des recherches reflète les travaux que j'ai conduits à L'île de la Réunion de 1990 à 2000 et à Rennes de 2001 à 2010. Ceux-ci n'auraient pu être réalisés sans le concours efficace et très souvent amical de très nombreux collègues du CIRAD et de l'INRA, de l'université de la Réunion, sans l'implication des stagiaires et thésards que j'ai eu la chance d'encadrer et aussi sans les techniciens et ingénieurs des organismes de développement et des instituts techniques qui m'ont aidé dans mes recherches. Je n'oublie pas non plus les élèves de l'île de la Réunion pour leur disponibilité et leur confiance.

A tous, qu'il m'est difficile de nommer sans faire d'oubli tellement vous êtes nombreux, je tiens à vous adresser mes plus sincères remerciements. J'espère ne choquer personne en omettant volontairement les noms, je vous garde tous très présents dans mes pensées.

Je voudrais aussi saluer les différents responsables du CIRAD et de l'INRA qui m'ont permis de mener mes travaux de recherche dans ces deux institutions ; j'ai vécu cette alternance comme très motivante et riche d'expériences et d'enseignements. Merci donc à Jean-Pascal Pichot et Philippe Leterme, les facilitateurs de ma mise à disposition à l'INRA, Philippe Mérot et Chantal Gascuel qui m'ont accueilli à l'UMR SAS, Emmanuel Torquebiau et Hervé Saint Macary, mes responsables d'unité au CIRAD, avec qui j'ai gardé un contact permanent ; sans eux, cette "aventure" institutionnelle n'aurait pas été possible.

Je suis très honoré de compter parmi les membres du jury, Jean Boiffin, Bernard Faye et Jean-Philippe Steyer en qualité de rapporteurs, Philippe Leterme et François Guerrin comme examinateurs et Rémy Courdier qui a accepté de présider ce jury. Je vous suis reconnaissant pour le temps que vous avez consacré à la lecture de ce mémoire, à la rédaction des rapports (pour les rapporteurs) qui ont été pour moi une nouvelle source de réflexion propice à la préparation de la soutenance. Merci également pour les échanges très intéressants lors de la soutenance.

Je veux faire une mention spéciale pour François Guerrin, mon collègue et ami depuis de nombreuses années. Nous n'avons cessé de travailler ensemble depuis l'ATP (un peu avant même) et dans de nombreux projets successifs, malgré la distance : toi de l'INRA au CIRAD et moi du CIRAD à l'INRA ! Bref tout un programme. Merci à toi François pour ton aide jusque dans la rédaction de cette HDR que tu as accepté de diriger.

Le soutien de ma petite famille d'ici, à La Réunion, et d'ailleurs, en métropole, m'est toujours très précieux. Merci à vous tous et à toi Hélène plus spécialement.

I Présentation du candidat

I.1. Résumé du parcours professionnel

Mon parcours et mon expérience professionnels, aussi bien dans la construction de problématiques de recherche, la conception et la conduite d'expérimentations sur les systèmes biophysiques, l'analyse systémique aux niveaux de l'exploitation et du territoire, que dans la gestion de projets et l'animation d'équipes de recherche pluridisciplinaires, se caractérisent par deux périodes complémentaires.

1. De 1985 à 2000, en accord avec les missions du CIRAD¹, mes travaux de recherches à La Réunion ont tout d'abord été fortement ancrés dans les enjeux de développement et m'ont conduit à la diffusion de nombreux résultats sous forme de rapports, ouvrages, présentations orales, et à l'encadrement d'étudiants ingénieurs (une quinzaine). Dans ce contexte, mon implication avec les organisations professionnelles était très importante. Durant cette période, j'ai ainsi contribué à plusieurs projets de recherche-développement pour la mécanisation des exploitations, financés par les collectivités locales ; cette recherche a été menée dans le cadre de l'équipe pluridisciplinaire en élevage CIRAD-INRA-ITEB², à laquelle j'étais rattaché scientifiquement. J'ai aussi assuré la responsabilité d'une unité du CIRAD à la Réunion comprenant 10 agents, dont 4 chercheurs, des départements CEEMAT³, puis SAR⁴ durant plusieurs périodes, 1989-90, 1991-93, 1995-97, avec un budget annuel compris entre 3 et 4 MF (contrat de plan Etat-collectivités). Cette responsabilité comprenait la représentation de ces départements du CIRAD auprès des autorités locales ainsi que la gestion administrative et financière.

Impliqué dans la programmation des recherches du CIRAD à la Réunion, j'ai fortement contribué à la création d'un projet transversal concernant 6 à 7 chercheurs, précurseur du PADEF⁵ que j'ai animé de 1997 à 1999. Puis, j'ai initié et animé l'équipe « Gestion des déchets organiques » comprenant 6 agents, dont 3 chercheurs, de 1997 à 2000, en assurant également la représentation auprès des autorités locales et la gestion administrative et financière.

J'ai également coordonné deux projets financés par la CORDET⁶, sur la conservation des fourrages en 1990-92 (300 kF) et sur la gestion des effluents d'élevage en 1994-96 (200 kF). Puis, avec François Guerrin (alors Ingénieur d'Etudes INRA, mis à disposition du CIRAD à la Réunion), j'ai coordonné l'Action Thématique Programmée du CIRAD « Modélisation des flux de biomasse et des transferts de fertilité » (ATP 99/60 – 1,2 MF), menée de 1999 à 2002 et impliquant 5 équipes de l'INRA des départements BIA, SAD et EA⁷, 4 équipes du CIRAD des départements CA et TERA⁸, et une équipe de l'université de la Réunion (Institut de recherche en mathématiques et informatique appliquée).

2. De 2000 à 2009, sans renier l'intérêt de démarches finalisées vers le développement auxquelles je continue à contribuer fortement, j'ai sollicité ma mise à disposition de l'INRA pour évoluer vers des démarches plus cognitives, en élaborant avec les hiérarchies des unités concernées un projet de rapprochement entre l'INRA et le CIRAD. Œuvrant toujours à ce rapprochement, mon positionnement à l'UMR SAS⁹ de Rennes a permis l'implication d'équipes de l'INRA et du CIRAD dans

¹ Centre de coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement

² Institut National de la Recherche Agronomique

Institut Technique de l'Élevage Bovin, devenu Institut de l'Élevage (IE)

³ Centre d'Etude et d'Expérimentation en Machinisme Agricole et Technologie agro-alimentaire

⁴ Systèmes Agro-alimentaires et Ruraux

⁵ Pôle Agriculture Durable Environnement et Forêt

⁶ Commission d'Orientation des Recherches dans les Dom et Tom

⁷ Biométrie et Intelligence Artificielle ; Sciences pour l'Action et le Développement ; Environnement Agronomie

⁸ Cultures Annuelles ; Territoires Espace Ressources Acteurs

⁹ Sol Agro&hydro système Spatialisation

trois autres projets de recherche depuis 2000 : Programme Porcherie Verte (67 + 81 k€), ANR-06-PADD-017 SPA/DD¹⁰ (420 k€), ANR-08-STRA-15 ISARD¹¹ (957 k€).

Dans ce contexte, j'ai produit des publications plus académiques, co-encadré des thèses (1 soutenue) ou participé à leur encadrement (4 soutenues) et encadré un post-doctorant (2 ans). Durant cette période, j'ai également effectué des expertises sur les systèmes d'élevage : validation des procédés de compostage pour la Préfecture de Région Bretagne, étude sur le compostage pour le CORPEN¹², analyses de systèmes d'élevage pour le CIRAD, à l'île Rodrigues (Maurice) et en Polynésie Française. Je participe au comité de pilotage du projet ANR-PRECODD ECODEFI¹³. J'ai aussi réalisé des enseignements pour des étudiants de niveau Master I et II et ingénieurs (Agrocampus Ouest, Université Montpellier II, ENVAM¹⁴, UVED¹⁵), concernant 1) la relation agriculture – élevage à l'échelle du territoire, 2) le bilan environnemental du compostage et 3) la gestion agronomique des effluents d'élevage.

J'ai développé des partenariats scientifiques avec plusieurs UMRs impliquant l'INRA : Production du lait (PL), Système d'élevage, nutrition animale et humaine (SENAH), Environnement et grandes cultures (EGC) et Sciences action développement activités produits territoires (SADAPT), ainsi qu'avec les instituts techniques : Institut de l'élevage (IE), Institut du porc (IFIP), Institut technique de l'aviculture (ITAVI) et les chambres d'agriculture de Bretagne. Je participe au réseau mixte technologique (RMT) Elevage et environnement pour lequel j'ai coordonné une expertise collective sur l' « Evaluation des systèmes de production animale à l'échelle du territoire ». J'ai également participé à une session prospective du RMT Fertilisation et environnement.

Durant cette mise à disposition, j'ai maintenu des contacts très étroits avec le CIRAD. J'ai continué mes collaborations avec les chercheurs de la Réunion et avec des organisations de développement (Sica-Lait, Fédération réunionnaise des coopératives agricoles, Chambre d'agriculture). J'ai participé à la création de l'unité Risque environnemental lié au recyclage des déchets (UPR Recyclage et risque), puis à son évaluation en 2006. J'ai également co-organisé depuis cette date, avec Emmanuel Doelsch, des séminaires mensuels d'animation scientifique. Durant 2 ans (2008 – 2009), j'ai animé un des deux axes scientifiques structurant les recherches de l'unité (6 chercheurs), l'autre axe étant animé par Emmanuel Doelsch, et ai participé activement à son évaluation par l'AERES¹⁶ (visite de la commission le 7/01/2010), notamment pour l'élaboration du projet scientifique pour le prochain quadriennal.

En accord avec mon directeur d'unité du CIRAD, ma mise à disposition de l'INRA a pris fin en juillet 2010. J'ai sollicité une affectation à la Réunion (1) pour poursuivre mes recherches sur la conception et l'utilisation de modèles de simulation pour la gestion des matières organiques et sur l'évaluation environnementale des systèmes de production animale, (2) pour contribuer à l'articulation des recherches entre unités et avec les partenaires de la recherche et du développement au sein des pôles du CIRAD de la Réunion. Depuis janvier 2011, je suis responsable du programme PILMO¹⁷ du CIRAD à la Réunion (5 chercheurs, 3 doctorants, 6 techniciens) et ai contribué avec François Guerrin et les collègues responsables des programmes CIEEL¹⁸, CAS¹⁹ et GERT²⁰ à l'émergence d'un pôle centré sur les « Impacts et services environnementaux des activités agricoles en milieu tropical ». Je devrais prochainement prendre en charge l'animation de ce pôle (20 chercheurs, 7 doctorants, 32 techniciens et personnels administratifs).

¹⁰ Agence Nationale de la Recherche – Programme Agriculture et Développement Durable – Projet Systèmes de Production Animale et Développement Durable

¹¹ ANR – Programme écoSystèmes, Territoires, Ressources vivantes et Agricultures – Projet Intensification des Systèmes de production Agricole par le Recyclage des Déchets

¹² Comité d'Orientation pour des Pratiques agricoles respectueuses de l'Environnement, Ministère de l'écologie du développement et de l'aménagement durable

¹³ ANR – Programme Ecotechnologies et Développement – Projet ECOconception et Développement de méthodologies de Fabrication Innovante de machines d'épandage – coordonné par le Cemagref (Institut de recherche en sciences et technologies pour l'environnement)

¹⁴ Campus numérique environnement et aménagement

¹⁵ Université virtuelle environnement et développement durable

¹⁶ Agence d'Evaluation de la Recherche et de l'Enseignement Supérieur

¹⁷ Pilotage des apports de matières organiques et risques environnementaux

¹⁸ Conduite intégrée des exploitations et des filières d'élevage

¹⁹ Productivité durable des systèmes canniens et fonctionnement des exploitations

²⁰ Aide à la gestion concertée des ressources et des territoires en milieu rural

I.2. Curriculum vitae détaillé

NOM – Prénom : PAILLAT – Jean-Marie

| | |
|------------------------------------|--|
| Nationalité : | Française |
| Date de naissance : | 30 septembre 1960 |
| Situation familiale : | Marié, 6 enfants |
| Adresse : | UPR CIRAD Recyclage et Risque, Station de la Bretagne, BP 20, 97408 Saint-Denis Messagerie Cedex 9, Ile de la Réunion |
| Profession : | Agronome, chercheur sur les systèmes d'élevage |
| Fonction : | Chercheur senior |
| Organisme : | Centre de coopération internationale en recherche agronomique pour le développement CIRAD , département Performances des systèmes de production et de transformation tropicaux, unité Recyclage et risque. Mis à disposition de décembre 2000 à juillet 2010 de l' INRA , UMR Sol Agro & hydro système Spatialisation (SAS) de Rennes |
| Compétences scientifiques : | Agronomie, zootechnie, sciences de l'environnement Gestion technique et modélisation conceptuelle des systèmes de production agricole |
| Thématiques : | Recherches sur les systèmes d'élevage : conservation des fourrages, transformation des matières organiques, émissions gazeuses, gestion des effluents d'élevage de leur production à leur utilisation. Analyse des pratiques des agriculteurs, typologies, modélisation conceptuelle et simulation des systèmes de production animale aux niveaux exploitation et territoire. |
| Autres expertises : | Relation agriculture – élevage, compostage, traitement des déchets, bâtiment d'élevage, mécanisation, gestion de biomasse |
| Régions d'expérience : | La Réunion, Maurice, Rodrigues, Polynésie Française, France métropolitaine (Grand Ouest), Vietnam |
| Formation et diplômes : | Baccalauréat série E (mention AB, Nantes 1978) Ingénieur agricole de l'Institut Supérieur Agricole de Beauvais (7 ^{ème} / 63, Beauvais 1983) Docteur en sciences agronomiques de l'Institut National Agronomique Paris-Grignon (mention très honorable avec les félicitations du jury, Paris 1995). Classé 2nd au concours CR1 Mathématiques et informatique appliquées (INRA, Paris 2006). Classé 1^{er} au concours IR Ingénieur en élevage et production animale (INRA, Paris 2008). |
| Compétences linguistiques : | Langue maternelle : Français Langue de travail : Anglais |

**Expérience
professionnelle :**

Depuis juillet 2010 :

Chargé de recherches (1) gestion des effluents d'élevage à l'échelle de l'exploitation et du territoire et (2) bilan environnemental du procédé de compostage.

- Responsable du programme « Pilotage des apports organiques et impacts environnementaux » du CIRAD à la Réunion (depuis janvier 2011).
- Coordinateur de la tâche « Acquisition et formalisation des connaissances sur la gestion des PRO dans les territoires » du projet ISARD (ANR-STRA 2009-2012).

En projet pour 2011 : Animateur du pôle « Impact et services environnementaux des activités agricole en milieu tropical » du CIRAD à la Réunion.

Décembre 2000 à juillet 2010 :

Chargé de recherches (1) gestion des effluents d'élevage à l'échelle de l'exploitation et du territoire et (2) bilan environnemental du procédé de compostage.

- Responsable de l'animation scientifique de l'axe « gestion des produits résiduels organiques hors sol et dans les territoires » de l'unité Recyclage et risque du CIRAD (2008 – 2009).
- Responsable scientifique de l'équipe SAS dans le projet ISARD et coordinateur de tâche.
- Responsable scientifique de l'équipe SAS dans le projet SPA/DD (ANR-ADD 2007-2010).
- Participation au projet inter-institutionnel IE, IFIP, INRA « Modélisation dynamique des impacts environnementaux des exploitations d'élevage » (oct. 2004 à déc. 2008).
- Responsable de l'action de recherche « Bilan environnemental du compostage d'effluents porcins » du programme GIS – Porcherie Verte, financement ADEME (2002-2005).
- Coordinateur du projet INRA – CIRAD « Systèmes de culture et effluents d'élevage. Etude des dynamiques de l'azote en situations pédoclimatiques et culturales contrastées » (2001-2003).

Septembre 1995 à décembre 2000 :

Chargé de recherches sur la gestion des effluents d'élevage et responsable du projet transversal du CIRAD à La Réunion « Gestion des espaces et des ressources naturelles ».

- Initiateur et animateur du pôle « Agriculture durable, environnement et forêts » du CIRAD à la Réunion (Sept. 1997 à juin 1999). Initiateur et animateur de l'équipe « Gestion des déchets organiques » du CIRAD à la Réunion (Sept. 1997 à avril 2000).
- Coordinateur de l'ATP 99/60 du CIRAD « Modélisation des flux de biomasse et des transferts de fertilité » (Janv. 1999 à juin 2002).
- Coordinateur du projet financé par la Commission d'orientation des recherches dans les DOM-TOM « Gestion des effluents d'élevage à la Réunion » (Avril 1994 à déc. 1996).

Représentant exécutif du CIRAD – département Systèmes agro-alimentaires et ruraux (SAR) à La Réunion (Oct. 1995 à juillet 1997).

Juin 1985 à septembre 1995 :

Missions :

Recherches sur la mécanisation des productions fourragères et des exploitations d'élevage au CIRAD à La Réunion, au sein d'une équipe de recherche CIRAD – INRA – ITEB.

- Simultanément à la conduite des projets de recherche et des activités d'animation et de gestion, préparation de la thèse de doctorat à l'INA-PG (Déc. 1990 à juin 1995).
- Coordinateur du projet de la Commission d'orientation des recherches dans les DOM-TOM « Ensilage en balles enrubannées en conditions tropicales » (Sept. 1990 à déc. 1992).

Chargé de l'animation et du suivi administratif et financier du CIRAD – SAR à La Réunion (Juillet 1991 à juin 1993).

Responsable du Centre d'études et d'expérimentations du machinisme agricole et de technologie agro-alimentaire (CEEMAT – dép. du CIRAD) à La Réunion (Juillet 1989 à avril 1990).

Septembre 1983 à juin 1985 :

Mise en place d'expérimentations sur la mécanisation des petites exploitations agricoles des Hauts de la Réunion dans le cadre d'un poste de volontariat à l'aide technique au CEEMAT puis d'un contrat complémentaire CDD au CIRAD (janv. 1985 à juin 1985).

Maurice 1989 et 1990 : Formation d'ingénieurs agronomes et techniciens agricoles des usines sucrières

Nouvelle Calédonie 1993 : Coordination des recherches en élevage entre les équipes de la Réunion et de la Nouvelle-Calédonie

Guadeloupe-Martinique 1994 : Participation au conseil scientifique de la station de zootechnie INRA CRAAG.

Rodrigues 1999 : Support for the EU project « Erosion control on the island of Rodrigues » : Evaluation of livestock husbandry and proposals for action.

Polynésie Française 2006 : Etude des techniques de gestion et de valorisation des effluents porcins pour le Centre d'insémination et de multiplication d'Opunohu (île de Moorea) du Service du Développement Rural de Polynésie française.

Vietnam 2006 : Meeting on « Environmental, social, and economical sustainable development of pig production in Cambodia, Laos, Philippines and Viet Nam », preparation for EU project FP7.

Sénégal 2010 : Séminaire à mi-parcours du projet ANR-08-STRA-15 ISARD.

Formations suivies :

Tableur Microsoft Excel : La Réunion, 1989

Anglais : La Réunion, 1996

SGBD Microsoft Access : La Réunion, 1998

Habilitation électrique : Rennes, 2001

Ecole chercheur INRA « Aide à la décision » : La Londe les Maures, 2002

Statistiques : Rennes, 2003

Modélisation sous Vensim – utilisation du modèle Magma : Rennes, 2003

Formations dispensées :

Modélisation et utilisation du langage UML : Paris, 2005

Anglais perfectionnement : Rennes, 2006-2007

Séminaire « Réflexives : doctorant-encadrant » : Ronces les Bains, 2010

1989-1990, professionnels (24 h/an): Travail du sol - tome 2. Document de formation, CEEMAT, CIRAD, Montpellier, 142 p.

2004, DAA niveau M1 (4 h) : Relation agriculture élevage et protection de l'environnement en contexte tropical - Cas de l'île de la Réunion - Analyse de la complémentarité des systèmes de production à différentes échelles et niveaux d'organisation : exploitation agricole (niveau individuel) et territoire (niveau collectif) – module agriculture tropicale, Agrocampus Ouest, Rennes, 56 dia.

2005-2006-2007-2008, DAA niveau M2 (3 h/an) : Compostage des matières organiques d'origine animale - Bilan environnemental - module recyclage des déchets, Agrocampus Ouest, Rennes, 53 dia.

2006-2008, ingénieurs-chercheurs (2 h/an) : Compostage : processus et moyens de contrôle – Impact environnemental. Cours UVED « Impact agronomique et environnemental de la gestion des matières organiques – Application aux pays du Sud », CIRAD, Montpellier, France, 34 dia, enregistrement sous Speechi.

2008-2010 DAA niveau M1 (2 h/an) : Gestion agronomique des effluents d'élevage – module techniques culturales, Agrocampus Ouest, Rennes, 43 dia.

2008-2009-2010, niveau M2 (3 h/an) : Gestion agronomique des effluents d'élevage. Visioconférence Master EPSED, UM2 – CIRAD, Montpellier, 46 dia.

Encadrement :

5 Bac + 4 : E. Singainy (1992), A.T. Nouroudine (1995), B. Hélène (1996), A. Onaly (1997), N. Collignon (2004).

26 Bac + 5 : F. Arnold (1984), E. Adjiri (1991), S. Reynaud et M. Thiery (1995), F. Delattre (1996), M. Fontaine (1997), S. Chollet (1998), H. Prêcheur et L. Rakatomalala (1999), S. Richard (2000), C. Fernandez, J. Sansoulet et S. Raux (2001), L. Comont (2002), Luth (2003), V. Emonet-Denand (2005), L. Deltour et G. Manac'h (2007), F. Brac de la Perrière, P.E. Fouque, C. Mareschal, V. Pasquiou et C. Perrot (2008-2009), N. Valmar et N. Salifou (2009), C. Montfort (2010).

7 Ingénieurs d'études : J.-C. Dhuin (1993), J.-Y. Gallo (1995-96), M. Lorré (1996-97), P. Fraboulet (1997-98), D. Renault (1998-99), L. Carut (1999-2000), Y. Desjeux (05-07 2009), G. Chirié (12 2009-03 2010).

3 Doctorants (co-encadrant à titre principal) : N. Abd El Kader (2004)²¹, J.M. Médoc (thèse interrompue)²², D. Oudart (2009-2012)²³.

²¹ Voir liste des travaux encadrés

²² Cette thèse, intitulée « Utilisation de modèles pour élaborer des stratégies de gestion individuelle et collective des effluents d'élevage », dont j'assurais le co-encadrement avec François Guerrin et Philippe Leterme (Pr Agrocampus Ouest) a été interrompue suite à l'avis du 3^{ème} comité de thèse de juin 2007, puis au changement d'affectation de J.-M. Médoc début 2008.

²³ Cette thèse, intitulée « Modélisation de la stabilisation de la matière organique et des émissions gazeuses dans les procédés de transformation hors sol. Application au compostage des effluents avicoles de la Réunion » et dont j'assure le co-encadrement avec Etienne Paul (Pr INSA Toulouse) et Paul Robin (UMR Inra Agrocampus Ouest Sol Agro&hydro système Spatialisation Rennes), est financée par Crête d'Or Entreprise (production, transformation et commercialisation des produits avicoles de la Réunion) en convention CIFRE depuis le 2 novembre 2009.

**Activités
complémentaires :**

9 Doctorants (en appui)²¹ : A. Hélias (2003) avec participation au jury, X. Chardon (2008), J. Vayssières (2008), C. Rigolot (2009), Luth (2007-2011), Z. Afoutni (2009-2012), K. Dhaouadi (2009-2012), Y. Zeng (2009-2011), N. Rabetokotany (2010-2013).

1 Post-doctorant : S. Lopez-Ridaura (2006-2007).

Relecture d'articles : J. Agr. Eng. Research, J. Artificial Sci. and Social Simulation, Journées de la recherche Avicole, Journées de la recherche Porcine

Expertise de projets : ANRT, Ademe, GIS porc, Préfecture de Région Bretagne

Comité de pilotage projet : ECODEFI – ANR Precodd (Cemagref)

Comités de thèses (11) : Hélias, Abd El Kader, Vayssières, Chardon, Médoc, Luth, Oudart, Dhaouadi, Afoutni, Zeng, Rabetokotany

Publications²⁴ :
(Voir listes ci-après)

30 articles de périodiques :

12 dans revues à facteur d'impact [Ai]
+ 5 soumis [Ai] + 4 en préparation [Ai],
18 dans autres revues à comité de lecture [Ac].

12 ouvrages et chapitres d'ouvrages :

2 ouvrages [O],
10 chapitres [Oc].

75 communications :

37 dans congrès internationaux avec publication des actes [Ci],
17 dans autres congrès avec publication des actes [Ca],
21 dans colloques et séminaires sans actes [Cs].

30 rapports :

2 diplômant [Rd],
23 de recherche [Rr],
5 d'expertise [Re].

30 autres documents :

19 d'animation [Da],
9 à vocation pédagogique [Dp],
2 logiciels enregistrés [Le].

²⁴ Les index entre crochets permettent de retrouver ces publications dans le mémoire des travaux (partie II)

I.3. Liste des publications

Contrairement à la règle de classement alphabétique, habituellement retenue pour lister les publications, j'ai adopté un classement chronologique au sein de chacune des catégories de production scientifique. L'indexation a pour objectif de retrouver ces références dans le mémoire des travaux (partie II).

I.3.1. Articles de périodiques

Revue à facteur d'impact [Ai]

- [Ai 1] **PAILLAT J.-M.**, GAILLARD F., 2001. Air-tightness of wrapped bales and resistance of stretch film under tropical and temperate conditions. *J. Agric. Engng Res.* 79 (1), 15-22.
- [Ai 2] COURDIER R., GUERRIN F., ANDRIAMASINORO F.H., **PAILLAT J.-M.**, 2002. Agent-bases simulation of complex systems : application to collective management of animal wastes. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation* 5 (3), 30-56.
- [Ai 3] **PAILLAT J.-M.**, ROBIN P., HASSOUNA M., LETERME P., 2005. Predicting ammonia and carbon dioxide emissions from carbon & nitrogen biodegradability during animal waste composting. *Atmospheric Environment* 39, 6833-6842.
- [Ai 4] AUBRY C., **PAILLAT J.-M.**, GUERRIN F., 2006. A conceptual model of animal waste management in the Reunion Island. *Agricultural Systems* 88 (2-3), 294-315.
- [Ai 5] BASSET-MENS C., VAN DER WERF H.M.G., ROBIN P., MORVAN T., HASSOUNA M., **PAILLAT J.-M.**, VERTES F., 2006. Methods and data for the environmental inventory of contrasting pig production systems. *Journal of Cleaner Production*, Vol. 15 (15) 1395-1405.
- [Ai 6] ABD EL KADER N., ROBIN P., **PAILLAT J.-M.**, LETERME P. 2007. Turning, compacting and the addition of water as factors affecting gaseous emissions in farm manure composting. *Bioresource Technology* 98, 2619-2628.
- [Ai 7] HASSOUNA M., ESPAGNOL S., ROBIN P., **PAILLAT J.-M.**, LI Y., 2008. Monitoring NH₃, N₂O and CH₄ emission during pig solid manure storage: effect of turning. *Compost Science and Utilization* Vol.16, No 4, 267-274.
- [Ai 8] LOPEZ-RIDAURA S., VAN DER WERF H.M.G., **PAILLAT J.-M.**, 2008. Environmental evaluation of transfer and treatment of excess pig slurry by life cycle assessment. *Journal of Environmental Management* 90, 1296-1304. Doi:10.1016/j.envman.2008.07.008.
- [Ai 9] BONNEAU M., BELINE F., DOURMAD J.-Y., HASSOUNA M., JONDREVILLE C., LOYON L., MORVAN T., **PAILLAT J.-M.**, RAMONET Y., ROBIN P., 2008. Connaissance du devenir des éléments à risques dans les différentes filières de gestion des effluents porcins. *INRA Prod. Anim.*, 21 (4), 325-344.
- [Ai 10] BONNEAU M., DOURMAD J.-Y., GERMON J.-C., HASSOUNA M., LEBRET B., LOYON L., **PAILLAT J.-M.**, RAMONET Y., ROBIN P., 2008. Connaissance des émissions gazeuses dans les différentes filières de gestion des effluents porcins. *INRA Prod. Anim.*, 21 (4), 345-360.
- [Ai 11] VAYSSIERES J., GUERRIN F., **PAILLAT J.-M.**, LECOMTE P., 2009. GAMEDE: A Global Activity Model for Evaluating the Sustainability of Dairy Enterprises. Part I: Whole-farm dynamic model. *Agricultural Systems*, vol.101: n°3 p. 128-138.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.agry.2009.05.001>.
- [Ai 12] RIGOLOT C., ESPAGNOL S., ROBIN P., HASSOUNA M., BÉLINE F., **PAILLAT J.-M.**, DOURMAD J.-Y., 2010. Mathematical modelling of manure production by pigs. Part II: NH₃, N₂O and CH₄ emissions and nutrient and matter flows in animal house and during manure storage and treatment. *Animal*, vol.4: n°8, p. 1413-1424. doi:10.1017/S1751731110000509.

Soumis dans des revues à facteur d'impact [Ai] ou en préparation

- [Ai 13] ROBIN P., HASSOUNA M., **PAILLAT J.-M.** A strategy based on conservation laws to improve emission factors of animal houses. *Environmental Science and Technology* (en révision).

- [Ai 14] SANSOULET J., GÉNERMONT S., MORVAN T., SAINT MACARY H., **PAILLAT J.-M.**, Combined effect of sugarcane trash mulch slurry properties and tropical climatic conditions on ammoniac volatilization after pig slurry application. Atmospheric Environment (version révisée soumise 01-2011).
- [Ai 15] CHARDON X., et al. MELODIE : a whole-farm model to study the dynamics of nutrients in integrated dairy and pig farms. Comp. and Elect. in Agri. (soumis).
- [Ai 16] **PAILLAT J.-M.**, ROBIN P., HASSOUNA M., LETERME P. Modelling kinetics of H₂O loss and CO₂ & NH₃ emissions during animal manure composting. (soumission à Compost Science and Utilization prévue 03-2011).
- [Ai 17] LOPEZ-RIDAURA S., GUERRIN F., VAN DER WERF H.M.G., MORVAN T., **PAILLAT J.-M.**, Modelling collective manure management. A case study of pig slurry management in Western France. Environmental Modelling and Software (en préparation).
- [Ai 18] MEDOC J.-M., **PAILLAT J.-M.**, LETERME P., PORPHYRE V., GUERRIN F. Assessment of the balance between livestock effluents production and nutrient demand by crops and fishponds in livestock production areas. J. Env. Manag. (en préparation).
- [Ai 19] SANSOULET J., GÉNERMONT S., MORVAN T., **PAILLAT J.-M.** Measuring and Modelling Ammonia Volatilization from Cattle Slurry applied to Grassland. Environmental pollution (en préparation).
- [Ai 20] **PAILLAT J.-M.**, LOPEZ-RIDAURA S., VAN DER WERF H.M.G. MÉDOC J.-M., SAINT MACARY H., GUERRIN F. Livestock effluent management at the territorial level: case of collective treatment plants and spreading plans. J. Env. Manag. (en préparation).
- [Ai 21] MEDOC J.-M., SAINT MACARY H., **PAILLAT J.-M.**, BRACCO I., WASSENAAR T. Les bilans régionaux d'éléments, outils de gestion des déchets. Cahiers Agriculture (soumis 02-2011).

Autres revues avec comité de lecture [Ac]

- [Ac1] MAROUZE C., **PAILLAT J.-M.**, VERGEZ P., 1988. Mécanisation de la récolte du géranium. Méc. Agric. Tech. alim. Trop., CIRAD (Ed.), n°103-104, 167-172.
- [Ac2] **PAILLAT J.-M.**, 1988. Mécanisation des productions fourragères. Méc. Agric. Tech. alim. Trop., CIRAD (Ed.), n°103-104, 173-178.
- [Ac3] **PAILLAT J.-M.**, 1995. Elevage. Succès pour l'ensilage en balles rondes sous film plastique. Magazine CIRAD Réunion. (1) : 2-3.
- [Ac4] BLANFORT V., HASSOUN P., MANDRET G., **PAILLAT J.-M.**, 1996. Elevage. Augmentation des productions animales. Magazine CIRAD Réunion : Spécial rapport annuel 1995 (3) : 34-36.
- [Ac5] PERRET S., MANDRET G., **PAILLAT J.-M.**, MICHELON R., LANGELLIER P., CHANALER P.F., COMBRES J.C., 1996. Environnement. Gestion des sols, de l'eau et des intrants. Magazine CIRAD Réunion : Spécial rapport annuel 1995 (3) : 56-58.
- [Ac6] BLANFORT V., CHABANNE A., MICHELLON R., **PAILLAT J.-M.**, PERRET S., 1997. Environnement. Gestion des espaces et des ressources naturelles. Magazine CIRAD Réunion : Spécial rapport annuel 1996 (7) : 56-58.
- [Ac7] BLANFORT V., MANDRET G., **PAILLAT J.-M.**, ROBERGE G., 1997. Elevage. Production et gestion des ressources fourragères. Magazine CIRAD Réunion : Spécial rapport annuel 1996 (7) : 32-34.
- [Ac8] BLANFORT V., CHABALIER P., CHABANNE A., GUERRIN F., **PAILLAT J.-M.**, PERRET S., TASSIN J., 1998. Environnement et forêts. Gestion des effluents d'élevage. Magazine CIRAD Réunion : Spécial rapport annuel 1997 (11) : 56-58.
- [Ac9] BLANFORT V., CHABALIER P., CHABANNE A., GUERRIN F., **PAILLAT J.-M.**, PERRET S., TASSIN J., 1998. Environnement et forêts. Gestion des espaces et des ressources renouvelables. Magazine CIRAD Réunion : Spécial rapport annuel 1997 (11) : 51-55.

- [Ac10] BLANFORT V., HASSOUN P., **PAILLAT J.M.**, TILLARD E., 1998. Elevage. Production et gestion des ressources fourragères. Magazine CIRAD Réunion : Spécial rapport annuel 1997 (11) : 31-34.
- [Ac11] BLANFORT V., HASSOUN P., **PAILLAT J.M.**, TILLARD E., 1998. Elevage. Valorisation des ressources alimentaires dans les systèmes d'élevage. Magazine CIRAD Réunion : Spécial rapport annuel 1997 (11) : 35-37.
- [Ac12] **PAILLAT J.M.**, HASSOUN P., 1998. Récolte et utilisation des résidus de pailles de canne à sucre. Magazine CIRAD Réunion (13) : 4.
- [Ac13] **PAILLAT J.-M.**, GUERRIN F., 1999. Portrait : l'équipe « gestion des déchets organiques » de la Bretagne. Magazine CIRAD Réunion (15) : 8.
- [Ac14] BLANFORT V., TASSIN J., CHABANNE A., **PAILLAT J.M.**, GUERRIN F., CHABALIER P., 1999. Agriculture des Hauts, environnement et forêts. Gestion des espaces et des ressources renouvelables. Magazine CIRAD Réunion : Spécial rapport annuel 1998 (14) : 29-34.
- [Ac15] CHABANNE A., **PAILLAT J.M.**, NORMAND F., PIRAUX M., FUSILLIER J.L., 1999. Agriculture des Hauts, environnement et forêts. Systèmes diversifiés durables pour les Hauts. Magazine CIRAD Réunion. Spécial rapport annuel 1998 (14) : 23-28.
- [Ac16] HASSOUN P., BLANFORT V., GRIMAUD P., **PAILLAT J.M.**, 1999. Elevage. Production et gestion des ressources fourragères. Magazine CIRAD Réunion : Spécial rapport annuel 1998 (14) : 35-37.
- [Ac17] **PAILLAT J.-M.**, GUERRIN F., CHABALIER P.-F., 2001. Agriculture durable, environnement et forêts. Gestion des déchets organiques. Magazine CIRAD Réunion : Spécial rapport annuel 2000 : 35-38.
- [Ac18] **PAILLAT J.-M.**, LOPEZ-RIDAURA S., GUERRIN F., VAN DER WERF H.M.G., MEDOC J.-M., MORVAN T., LETERME P., SAINT MACARY H., 2010. Les voies organisationnelles à l'échelle d'un territoire : cas des unités de traitement et des plans d'épandage collectifs. Colloques de l'Académie Agriculture de France, 2010 (1) : 119-134.

I.3.2. Ouvrages et chapitres d'ouvrages

Ouvrages et actes [O]

- [O1] MANDRET G., BLANFORT V., HASSOUN P., **PAILLAT J.M.**, TILLARD E. (Ed.), 2000 (*Synthèse*). Elevage bovin à la Réunion : synthèse de 15 ans de recherche. G. Mandret coord., Coll. Repères, Cirad Montpellier, 391 p.
- [O2] GUERRIN F., **PAILLAT J.-M.** (Ed.), 2003 (*Synthèse*). Modélisation des flux de biomasse et des transferts de fertilité - cas de la gestion des effluents d'élevage à l'île de la Réunion. Restitution des travaux de l'ATP 99/60. Actes du séminaire, 19-20 juin 2002, Montpellier, Cirad, cédérom.

Chapitres d'ouvrages [Oc]

- [Oc1] **PAILLAT J.-M.**, RIPPSTEIN G., HUGUENIN J., MARNOTTE P., DEAT M., 1999. Etablissement et entretien des prairies. In : Cultures fourragères tropicales, G. Roberge et B. Toutain (Ed.), coll. Repères, Cirad, Montpellier, 215-263.
- [Oc2] HASSOUN P., **PAILLAT J.M.**, BRUNSCHWIG P., 2000. Les ressources fourragères extérieures à l'exploitation. In : Mandret G. (ed.), Blanfort V. (ed.), Hassoun P. (ed.), Paillat JM (ed.), Tillard E. (ed.). L'élevage bovin à la Réunion : Synthèse de quinze ans de recherche. Montpellier : CIRAD, p. 209-223.
- [Oc3] HASSOUN P., **PAILLAT J.M.**, MANDRET G., BRUNSCHWIG P., BIGOT A., LATCHIMY J.Y., 2000. Les rations en élevage laitier. In : Mandret G. (ed.), Blanfort V. (ed.), Hassoun P. (ed.), Paillat JM (ed.), Tillard E. (ed.). L'élevage bovin à la Réunion : Synthèse de quinze ans de recherche. Montpellier : CIRAD, p. 225-256.

- [Oc4] MANDRET G., BLANFORT V., **PAILLAT J.M.**, BARBET MASSIN V., FONTAINE O., RIVIERE E., 2000. L'installation et la fertilisation des surfaces fourragères. In : Mandret G. (ed.), Blanfort V. (ed.), Hassoun P. (ed.), Paillat JM (ed.), Tillard E. (ed.). L'élevage bovin à la Réunion : Synthèse de quinze ans de recherche. Montpellier : CIRAD, p. 97-127.
- [Oc5] MANDRET G., **PAILLAT J.M.**, BIGOT A., FONTAINE O., LATCHIMY J.Y., RIVIERE E., 2000. Le comportement des espèces fourragères. In : Mandret G. (ed.), Blanfort V. (ed.), Hassoun P. (ed.), Paillat JM (ed.), Tillard E. (ed.). L'élevage bovin à la Réunion : Synthèse de quinze ans de recherche. Montpellier : CIRAD, p. 65-96.
- [Oc6] **PAILLAT J.M.**, BLANFORT V., 2000. Le fonctionnement des systèmes d'élevage. In : Mandret G. (ed.), Blanfort V. (ed.), Hassoun P. (ed.), Paillat JM (ed.), Tillard E. (ed.). L'élevage bovin à la Réunion : Synthèse de quinze ans de recherche. Montpellier : CIRAD, p. 165-175.
- [Oc7] **PAILLAT J.M.**, HASSOUN P., LATCHIMY J.Y., BRUNSCHWIG P., LEPETIT J., 2000. La constitution de réserves fourragères sous forme d'ensilage. In : Mandret G. (ed.), Blanfort V. (ed.), Hassoun P. (ed.), Paillat JM (ed.), Tillard E. (ed.). L'élevage bovin à la Réunion : Synthèse de quinze ans de recherche. Montpellier : CIRAD, p. 177-208.
- [Oc8] **PAILLAT J.M.**, MANDRET G., 2000. Le dispositif de recherche. In : Mandret G. (ed.), Blanfort V. (ed.), Hassoun P. (ed.), Paillat JM (ed.), Tillard E. (ed.). L'élevage bovin à la Réunion : Synthèse de quinze ans de recherche. Montpellier : CIRAD, p. 55-59.
- [Oc9] EMONET-DENAND V., PORPHYRE V., NGUYEN THI HOA LY, DANG HOANG BIEN, **PAILLAT J.-M.**, 2006. Classification of pig farms regarding environmental risk and internal use of pig manure. In : Porphyre V. and Nguyen Que Coi (Eds.), Pig production development animal-waste management and environment protection : a case study in Thai Binh province, Northern Vietnam, Hanoi, Prise publications, pp 83-106.
- [Oc10] GUERRIN F., MEDOC J.M., **PAILLAT J.-M.**, 2008. Mafate, modélisation et analyse de flux de matières à l'échelle de territoires. In : CIRAD (Ed.), Le CIRAD en 2007, Montpellier, CIRAD, pp 48-49.

1.3.3. Communications

Congrès et colloques internationaux avec publication des actes [Ci]

- [Ci1] **PAILLAT J.-M.**, DHUIN J.-C., LEPETIT J., MANDRET G., 1993 [poster]. Preservation of silage made in wrapped round bales in Réunion Island. XVII International Grassland Congress, 8- 21 february 1993, New-Zealand, pp 585-586.
- [Ci2] **PAILLAT J.-M.**, DHUIN J.-C., PIROT R., 1994 [poster]. Cost analysis of silage in wrapped round bales in the Réunion highlands. International Conference on Agricultural Engineering, AgEng 94, 29th august - 1st september, Milano, Italy, pp 649-650.
- [Ci3] **PAILLAT J.M.**, CAUMONT A., 1996 [poster]. Air-tightness of wrapped bales and resistance of stretch film under tropical conditions (96F-073). In : AgEng Madrid 96. Volume 2. Soil and water use. Energy and rural electrification. Processing. Environment. Book of abstracts. Espagne : Comision Espanola de Ingenieria Rural, p.948-949. International Conference on Agricultural Engineering, 1996-09-23/1996-09-26, (Madrid, Espagne).
- [Ci4] **PAILLAT J.M.**, GAILLARD F., CAUMONT A., 1996 [integral text]. Air-tightness of wrapped bales and resistance of stretch film under tropical conditions. Paper 96F-073. In : Caumont A., Marouze C. AgEng 96 Madrid. Participation du CIRAD-SAR. Rapport de mission (22-26 septembre 1996). Montpellier : CIRAD-SAR, .[9 p.]] p.. International Conference on Agricultural Engineering, 1996-09-22/1996-09-26, (Madrid, Espagne).
- [Ci5] **PAILLAT J.-M.**, DEMARQUILLY C., BLANFORT V., 1997. Additives as preservatives for wrapped round bales silage made under tropical climate. In : Anon. Proceedings of the XVIIIth international grassland congress = [Actes du XVIIIe congrès international sur les herbages]. s.l. : s.n., p.1-5. International Grassland Congress. 18, 1997-06-08/1997-06-19, Winnipeg, Canada.
- [Ci6] **PAILLAT J.-M.**, FRABOULET P., LORRE M., 1997. Récolte des pailles de canne à sucre - Dessiccation, conditionnement et traitement à l'ammoniac généré par l'hydrolyse de l'urée.

- In : 4ème Congrès international de l'ARTAS, 2ème Rencontre internationale en langue française : communications présentées au congrès 1997. Paris : AFCAS, p. 443-447. Congrès international de l'ARTAS. 4, 1997-10-12/1997-10-18, Saint-Denis, Réunion.
- [Ci7] GUERRIN F., COURDIER R., CALDERONI S., **PAILLAT J.-M.**, SOULIE J.-C., VALLY J.-D., 1998. Conception d'un modèle multi-agents pour la gestion des effluents d'élevage à l'échelle d'une localité rurale. In : Actes JFIADSMA'98. s.l. : s.n., 17 p.. Journées Francophones en Intelligence Artificielle Distribuée et Systèmes Multi-Agents (JFIADSMA'98). 6, 1998-11-18/1998-11-20, Pont-à-Mousson, France.
- [Ci8] **PAILLAT J.-M.**, HASSOUN P., PERRET S., 1998. Harvest of sugar cane straw - Drying and composition, ammonia / urea treatment and use for feeding dairy heifers. In : AgEng98, Oslo (Norvège), 1998. s.l. : s.n., 8 p.. AGENG 98, 1998, Oslo, Norvège.
- [Ci9] CHABALIER P., FARINET J.L., **PAILLAT J.-M.**, 1999. Gestion, traitement et valorisation agricole des effluents d'élevage à la Réunion. In : Rasolo F. (ed.), Raunet Michel (ed.). Gestion agrobiologique des sols et des systèmes de culture. Montpellier : CIRAD, p.577-587. Atelier international sur la gestion agrobiologique des sols et des systèmes de culture, 1998-03-23/1998-03-28, Antsirabe, Madagascar.
- [Ci10] GUERRIN F., COURDIER R., CALDERONI S., **PAILLAT J.-M.**, SOULIE J.-C., VALLY J.-D., 1999. Biomass : un modèle multi-agents pour aider à la gestion négociée d'effluents d'élevage. In : Nils Ferran. Modèles et systèmes multi-agents pour la gestion de l'environnement et des territoires. Antony : CEMAGREF, p. 359-378. Colloque SMAGET, 1998-10-05/1998-10-08, Clermont-Ferrand, France.
- [Ci11] ANDRIAMASINORO F., COURDIER R., GUERRIN F., **PAILLAT J.-M.**, 1999. Biomass : un modèle multi-agents d'aide à la gestion des effluents d'élevage. JFIADSMA'99, Journées Francophones d'Intelligence Artificielle Distribuée, Saint -Gilles de La Réunion, 8-10 nov. 1999.
- [Ci12] ROBIN P., HACALA S., **PAILLAT J.-M.**, 2002 [poster]. Heat partition during composting process of cattle manure. In : *10th International Ramiran Conference, 14-18 May 2002, Slovak Republic*. s.l. : s.n., 1 p.. International Ramiran Conference. 10, 2002-05-14/2002-05-18, République slovaque.
- [Ci13] ROBIN P., HACALA S., **PAILLAT J.-M.**, 2002 [integral text]. Heat partition during composting process of cattle manure. In : *10th International Ramiran Conference, 14-18 May 2002, Slovak Republic*. s.l. : s.n., [4] p.. International Ramiran Conference. 10, 2002-05-14/2002-05-18, République slovaque.
- [Ci14] SAINT MACARY H., GENERMONT S., **PAILLAT J.-M.**, FLURA D., CHABALIER P.-F., 2003 [poster]. Volatilisation d'ammoniac après épandage de lisier bovin et porcin. Actes du Symposium régional interdisciplinaire Les ruminants: élevage et valorisation, Cirad, GDS, La Réunion (F), 10-13 juin 2003.
- [Ci15] VAYSSIERES J., GUERRIN F., **PAILLAT J.-M.**, MARTIN-CLOUAIRE R., RELIER J.-P., 2003 [poster]. Modélisation conceptuelle de la gestion des flux d'azote en élevage bovin laitier à la Réunion. Actes du Symposium régional interdisciplinaire Les ruminants: élevage et valorisation, Cirad, GDS, La Réunion (F), 10-13 juin 2003, p. 22-23.
- [Ci16] GUERRIN F., **PAILLAT J.-M.**, 2003. Modelling Biomass Fluxes And Fertility Transfers: Animal Wastes Management In Reunion Island. In ModSim conference, International Congress on Modelling and Simulation, Integrative Modelling of Biophysical, Social and Economic Systems for Resource Management Solutions, Townsville (Australia), 14-17 July 2003.
- [Ci17] MEDOC J.-M., GUERRIN F., COURDIER R., **PAILLAT J.-M.**, 2005. A Multi-Modelling Approach to Help Agricultural Stakeholders Design Animal Wastes Management Strategies in the Reunion Island. n : Pahl-Wostl Claudia (ed.), Schmidt Sonja (ed.), Rizzoli Andrea E. (ed.), Jakeman Anthony J. (ed.). Complexity and integrated resources management. Transactions of the 2nd Biennial Meeting of the International Environmental Modelling and Software Society : IEMSS 2004 – 14-17 June 2004, University of Osnabrück, Germany. [Online]. Manno : IEMSS, p. 462-467. International Conference IEMSS 2004. 2, 2004-06-14/2004-06-17, Osnabrück, Allemagne.
- [Ci18] MEDOC J.-M., GUERRIN F., COURDIER R., RALAMBONDRAINY T., **PAILLAT J.-M.**, 2005. Use of simulation models to improve individual and collective management of pig effluents in

Grand-Ilet (Réunion Island). International Workshop on Pork Production "Porcherie Verte", A research Initiative on Environment-Friendly Pig Production, Paris, France, 25-27 May 2005.

- [Ci19] **PAILLAT J.-M.**, ROBIN P., HASSOUNA M., CALLAREC J., TOULARASTEL P., 2005 [poster]. Environmental assessment of composting pig slurry with wheat straw based on the Guernévez® process. International Workshop on Pork Production "Porcherie Verte", A research Initiative on Environment-Friendly Pig Production, Paris, France, 25-27 May 2005.
- [Ci20] **PAILLAT J.-M.**, ROBIN P., HASSOUNA M., LETERME P., 2005 [poster]. Predicting ammonia and carbon dioxide emissions from carbon & nitrogen biodegradability during animal waste composting. International Workshop on Pork Production "Porcherie Verte", A research Initiative on Environment-Friendly Pig Production, Paris, France, 25-27 May 2005.
- [Ci21] ROBIN P., HASSOUNA M., **PAILLAT J.-M.**, 2005 [poster]. Multi-element combined methods (MECM) increase the reliability of emission factor measurement. International Workshop on Pork Production "Porcherie Verte", A research Initiative on Environment-Friendly Pig Production, Paris, France, 25-27 May 2005.
- [Ci22] ESPAGNOL S., HASSOUNA M., ROBIN P., LEVASSEUR P., **PAILLAT J.-M.**, 2006. Emissions gazeuses (NH₃, N₂O, CH₄) au stockage, avec et sans retournement, de fumier porcin provenant d'une litière accumulée. 38^{èmes} Journées de la recherche porcine, ITP-INRA, Paris, 31/01-02/02. 2006. Journées Recherche Porcine, 38 41-48.
- [Ci23] LOPEZ-RIDAURA S., VAN DER WERF H.M.G., **PAILLAT J.-M.**, LE BRIS B., 2007. Transférer ou traiter ? Evaluation environnementale de deux modes de gestion du lisier excédentaire par Analyse de Cycle de Vie. 39^{èmes} Journées de la recherche porcine, ITP-INRA, Paris, 06-08/02/2007. 2007. Journées Recherche Porcine, 39 7-12.
- [Ci24] HASSOUNA M., **PAILLAT J.-M.**, ROBIN P., 2007. Predicting ammonia and carbon dioxide emissions from carbon and nitrogen biodegradability during animal waste composting. 1 p.p. International Ammonia Conference in Agriculture, 19-21 March 2007, Ede, Netherlands. - s.l.:s.n., 2007.
- [Ci25] HASSOUNA M., ROBIN P., **PAILLAT J.-M.**, 2007. Multi-element combined methods increase the reliability of emission factor measurement. 1 p.p. International Ammonia Conference in Agriculture, 19-21 March 2007, Ede, Netherlands. -s.l.:s.n., 2007.
- [Ci26] LOPEZ-RIDAURA S., VAN DER WERF H.M.G., **PAILLAT J.-M.**, 2007. Environmental evaluation of excess pig slurry management. 5th International conference LCA in foods. Gothenburg, Sweden, 25 - 26 April, 2007. LCA in foods, 5, 147-150.
- [Ci27] RIGOLOT C., ESPAGNOL S., ROBIN P., HASSOUNA M., BELINE F., **PAILLAT J.-M.**, DOURMAD J-Y. 2007. Modeling manure production by pigs. Effects of feeding, storage and treatment on manure characteristics and emissions of ammonia and greenhouse gases. In : 58th Annual Meeting of the European Association for Animal Production (EAAP), dublin, 26-29 August 2007. s.l. : s.n., 1 p..
- [Ci28] LOPEZ-RIDAURA S., GUERRIN F., **PAILLAT J.-M.**, VAN DER WERF H.M.G., MORVAN T., 2007 [poster]. Agronomic and Environmental Evaluation of Collective Manure Management for a Group of Farms. In : ESA, IEMSS, ASA, IFSA. Farming systems design 2007, International Symposium on Methodologies on Integrated Analysis on Farm Production Systems, September 10-12, 2007, Sicily . Pavia : La Goliardica Pavese, p. 92-93. International Symposium on Methodologies on Integrated Analysis on Farm Production Systems, 2007-09-10/2007-09-12, Sicile, Italie.
- [Ci29] LOPEZ-RIDAURA S., DELTOUR L., **PAILLAT J.-M.**, VAN DER WERF H.M.G., 2008. Comparing options for pig slurry management by life cycle assessment. 6th International Conference on LCA in the Agri-Food Sector, Zurich, November 12–14, 2008.
- [Ci30] LOPEZ-RIDAURA S., VAN DER WERF H.M.G., **PAILLAT J.-M.**, GUERRIN F., 2008. Environmental systems analysis of agricultural systems: Coupling dynamic simulation models with Life Cycle Assessment. In : SNTT. The challenge of creating social and technological innovation through system-thinking : Eight International Conference on EcoBalance, Dec.10 - 12, 2008, Tokyo, Japan . s.l. : s.n., 4 p. International Conference on Ecobalance. 8, 2008-12-10/2008-12-12, Tokyo, Japon.
- [Ci31] **PAILLAT J.-M.**, LOPEZ-RIDAURA S., GUERRIN F., VAN DER WERF H.M.G., MORVAN T., LETERME P., 2009. Simulation de la faisabilité d'un plan d'épandage de lisier de porc et

conséquences sur les émissions gazeuses au stockage et à l'épandage. 41èmes journées de la recherche porcine, 3-4 février 2009, Paris, Journées Recherche Porcine 41, 271-276.

- [Ci32] CHARDON X., RIGOLOT C., BARATTE C., MARTIN-CLOUAIRE R., RELIER J.P., RAISON C., LE GALL A., DOURMAD J.Y., POUPA J.C., DELABY L., MORVAN T., LETERME P., **PAILLAT J.-M.**, ESPAGNOL S., FAVERDIN P., 2009. A whole farm-model to simulate the environmental impacts of animal farming system: Melodie. ModNut 2009, 7e Workshop International: Modelling Nutrient Digestion and Utilization in Farm Animals, 2009-09-10/2009-09-12, Paris, France.
- [Ci33] SAINT MACARY H., MEDOC J.M., **PAILLAT J.-M.**, BRACCO I., WASSENAAR T., 2009. Les bilans régionaux, outils de gestion des déchets. In : 2IE, Waste Eng Conference Series, Ecole des mines d'Albi-Carmaux. Conférence internationale sur la valorisation des déchets et de la biomasse résiduelle dans les pays en développement, Ouagadougou, Burkina Faso, 9-11 juillet 2009. s.l. : s.n., 9 p.
- [Ci34] GUERRIN F., **PAILLAT J.-M.**, 2010. Collective animal manure management simulation and environmental impact assessment. EURO XXIV, 24th European Conference on Operational Research, July 11-14, 2010, Lisbon (P).
- [Ci35] HASSOUNA M., ROBIN P., BRACHET A., **PAILLAT J.-M.**, DOLLE J.B., FAVERDIN P., 2010. Development and validation of a simplified method to quantify gaseous emissions from cattle buildings. CIGR congress, Paper ID: CSBE100758., 2010-07-06, Québec City (Ca).
- [Ci36] OUDART D., ROBIN P., HASSOUNA M., **PAILLAT J.-M.**, 2010. Predicting the effect of C and N biodegradability, humidity and porosity on ammonia emission during animal manure composting. In : International Conference on Agricultural Engineering 2010 (AgEng 2010), September 6-8, 2010, Clermont-Ferrand, France. s.l. : s.n., 8 p.. International Conference on Agricultural Engineering 2010, 2010-09-06/2010-09-08, Clermont-Ferrand, France.
- [Ci37] SAINT MACARY H., HOUOT S., CAMBIER P., AUBRY C., **PAILLAT J.-M.**, PARNAUDEAU V., DOELSCH E., NDOUR Y.B., MASSE D., RABEHARISOA R.L., MASON A., ZELEM M.C., PAILLAT JAROUSSEAU H., GUERRIN F., 2010. Ecological intensification of agricultural production systems through waste recycling : the ISARD project. In : Wery Jacques (ed.), Shili-Touzi I. (ed.), Perrin A. (ed.). Proceedings of Agro 2010 : the XIth ESA Congress, August 29th - September 3rd, 2010, Montpellier, France. Montpellier : Agropolis international, p. 1023-1024. ESA Congress. 11, 2010-08-29/2010-09-03, Montpellier, France.

Autres congrès et colloques avec publication des actes [Ca]

- [Ca1] **PAILLAT J.-M.**, 1986. Identification des voies de mécanisation dans la zone de montagne Hauts de l'Ouest. In : Bilan de la recherche système dans les Hauts de l'Ouest de la Réunion. Saint-Denis : CIRAD-IRAT, p.243-288. Bilan de la recherche système dans les hauts de l'ouest de la Réunion, 1985-11-25/1985-11-27, (Saint-Denis, Réunion).
- [Ca2] **PAILLAT J.-M.**, MICHON A., 1995. Innovations dans les systèmes d'élevage des Hauts de La Réunion - 10 ans de partenariat actif entre les AFP et le CIRAD. Atelier méthodes participatives de recherche développement dans l'océan Indien, St Leu (Réunion), CIRAD, 11p.
- [Ca3] **PAILLAT J.-M.**, 1999. Ensilage en balles enrubannées à l'île de la Réunion - dessiccation du fourrage, résistance des films et conservation. Actes de la commission plastique et élevage, 16 juin 1999, Rochefort-Montagne, Comité des plastiques en agriculture, Paris, pp 15-31.
- [Ca4] CABIDOCHÉ Y.-M., CATTAN P., DOREL M., **PAILLAT J.-M.**, 2002. Intensification agricole et risque de pollution azotée des ressources en eau dans les départements français d'outre-mer insulaires : surveiller en priorité les pratiques agricoles dans les périmètres irrigués. In : S. Marlet et P. Ruelle (Ed.), 2002. Vers une maîtrise des impacts environnementaux de l'irrigation. Actes du séminaire, mai 2002, Montpellier, France. Cirad, Montpellier France, cédérom, 9 p.
- [Ca5] MORVAN T., ROBIN P., **PAILLAT J.-M.**, DOURMAD J.Y., 2002. Influence de l'alimentation sur le devenir des déjections – Volet 2 : transformation dans le sol des lisiers différenciés par le régime alimentaire et de mélanges lisier-matériau carboné compostés. In : 09/04-05, La Rochelle. Séminaire GIS porcherie verte, 2002. s.l. : s.n., p. 44-48. Séminaire GIS porcherie verte, 2002-09-04/2002-09-05, La Rochelle, France.

- [Ca6] **PAILLAT J.-M.**, ROBIN P., COMONT L., 2002. Effet du compostage d'effluents porcins sur les émissions gazeuses et les teneurs en éléments polluants. In : 09/04-05, La Rochelle. Séminaire GIS porcherie verte, 2002. s.l. : s.n., p. 99-103. Séminaire GIS porcherie verte, 2002-09-04/2002-09-05, La Rochelle, France.
- [Ca7] AUBRY C., **PAILLAT J.-M.**, GUERRIN F., 2003. Modélisation conceptuelle de la gestion des matières organiques issues des élevages dans les exploitations agricoles – L'exemple de l'île de la Réunion. In Guerrin F., (ed.), Paillat J.M., (ed.) Modélisation des flux de biomasse et des transferts de fertilité. Cas de la gestion des effluents d'élevage à l'île de la Réunion. Actes du séminaire. [Cd-Rom]. Montpellier, France: Cirad. Séminaire de l'ATP 99/60, 2002/06/19-20, Montpellier, France.
- [Ca8] COURDIER R., GUERRIN F., ANDRIAMASINORO F.H., **PAILLAT J.-M.**, 2003. Simulation agent appliquée à la gestion collective d'effluents d'élevage – Mise en œuvre des concepts génériques de la plate-forme Geamas au sein de l'application Biomas. In Guerrin F., (ed.), Paillat J.M., (ed.) Modélisation des flux de biomasse et des transferts de fertilité. Cas de la gestion des effluents d'élevage à l'île de la Réunion. Actes du séminaire. [Cd-Rom]. Montpellier, France: Cirad. Séminaire de l'ATP 99/60, 2002/06/19-20, Montpellier, France.
- [Ca9] FARINET J.-L., HURVOIS Y., **PAILLAT J.-M.**, 2003. Macsizut : un modèle d'aide au choix de techniques de traitement des lisiers de porc. In Guerrin F., (ed.), Paillat J.M., (ed.) Modélisation des flux de biomasse et des transferts de fertilité. Cas de la gestion des effluents d'élevage à l'île de la Réunion. Actes du séminaire. [Cd-Rom]. Montpellier, France: Cirad. Séminaire de l'ATP 99/60, 2002/06/19-20, Montpellier, France.
- [Ca10] GENERMONT S., MORVAN T., **PAILLAT J.-M.**, FLURA D., SAINT MACARY H., 2003. Volatilisation d'ammoniac après épandage de lisier en conditions tropicales – Cas des prairies d'altitude et de la canne à sucre à l'île de la Réunion. In Guerrin F., (ed.), Paillat J.M., (ed.) Modélisation des flux de biomasse et des transferts de fertilité. Cas de la gestion des effluents d'élevage à l'île de la Réunion. Actes du séminaire. [Cd-Rom]. Montpellier, France: Cirad. Séminaire de l'ATP 99/60, 2002/06/19-20, Montpellier, France.
- [Ca11] GUERRIN F., **PAILLAT J.-M.**, 2003. Modélisation des flux de biomasse et des transferts de fertilité – Cas de la gestion des effluents d'élevage à l'île de la Réunion – Introduction du séminaire. In Guerrin F., (ed.), Paillat J.M., (ed.) Modélisation des flux de biomasse et des transferts de fertilité. Cas de la gestion des effluents d'élevage à l'île de la Réunion. Actes du séminaire. [Cd-Rom]. Montpellier, France: Cirad. Séminaire de l'ATP 99/60, 2002/06/19-20, Montpellier, France.
- [Ca12] MORVAN T., CHABALIER P.-F., SAINT MACARY H., **PAILLAT J.-M.**, 2003. Biotransformations résultant de l'apport de produits organiques sur des sols de la Réunion. In Guerrin F., (ed.), Paillat J.M., (ed.) Modélisation des flux de biomasse et des transferts de fertilité. Cas de la gestion des effluents d'élevage à l'île de la Réunion. Actes du séminaire. [Cd-Rom]. Montpellier, France: Cirad. Séminaire de l'ATP 99/60, 2002/06/19-20, Montpellier, France.
- [Ca13] **PAILLAT J.-M.**, AUBRY C., MEDOC J.-M., 2003. Une typologie des systèmes de gestion des effluents d'élevage dans les exploitations de l'île de la Réunion. In Guerrin F., (ed.), Paillat J.M., (ed.) Modélisation des flux de biomasse et des transferts de fertilité. Cas de la gestion des effluents d'élevage à l'île de la Réunion. Actes du séminaire. [Cd-Rom]. Montpellier, France: Cirad. Séminaire de l'ATP 99/60, 2002/06/19-20, Montpellier, France.
- [Ca14] **PAILLAT J.-M.**, GUERRIN F., MEDOC J.-M., AUBRY C., 2003. Simulation de stratégies de gestion de matières organiques avec le modèle Magma. Application au cas d'une exploitation type. In Guerrin F., (ed.), Paillat J.M., (ed.) Modélisation des flux de biomasse et des transferts de fertilité. Cas de la gestion des effluents d'élevage à l'île de la Réunion. Actes du séminaire. [Cd-Rom]. Montpellier, France: Cirad. Séminaire de l'ATP 99/60, 2002/06/19-20, Montpellier, France.
- [Ca15] SAINT MACARY H., CHABALIER P.-F., GENERMONT S., MORVAN T., **PAILLAT J.-M.**, PAYET N., 2004. Gestion de l'azote en culture de canne à sucre : pratiques actuelles, puits potentiels et risques de pollution. In : La canne une passion à partager : rencontres internationales pluridisciplinaires octobre 2002. [Cd-Rom]. Piton Saint-Leu : Seml Reunion Museo, 14 p.. Colloque sur les Perspectives de développement de la canne à sucre en milieu insulaire, 2002-10-02/2002-10-05, Stella Matutina, Réunion.

- [Ca16] LETERME P., **PAILLAT J.-M.**, 2004. Systèmes de culture et effluents d'élevage - Étude des dynamiques de l'azote en situations pédoclimatiques et culturales contrastées, recherche de voies d'optimisation. In : Séminaire de restitution. Appels à proposition 2000 et 2001 du fonds commun Inra-Cirad, Montpellier 7 et 8 septembre 2004. Montpellier : CIRAD, p. 10-11. Séminaire de restitution du fonds commun Inra-Cirad, 2004-09-07/2004-09-08, Montpellier, France.
- [Ca17] **PAILLAT J.-M.**, LOPEZ-RIDAURA S., GUERRIN F., VAN DER WERF H.M.G., MEDOC J.-M., MORVAN T., LETERME P., SAINT MACARY H., 2009. Les voies organisationnelles à l'échelle d'un territoire : cas des unités de traitement et des plans d'épandage collectifs. Colloque Académie d'Agriculture de France, Elevages intensifs et environnement, les effluents : menace ou richesse ? 2009-04-28/2009-04-28, Paris, France.

Autres colloques et séminaires sans actes [Cs]

- [Cs1] **PAILLAT J.-M.**, GUERRIN F., 2002. Modélisation des flux de biomasse et des transferts de fertilité à l'échelle d'un territoire - Cas de la gestion individuelle et collective des effluents d'élevage à l'île de la Réunion. Séminaire d'animation scientifique, UMR Sol Agro&hydro système Spatialisation, INRA-Agrocampus Ouest, 7 novembre 2002, Rennes (F), 21dia.
- [Cs2] **PAILLAT J.-M.**, ROBIN P., HASSOUNA M., LETERME P., 2005. Compostage des matières organiques d'origine animale - Bilan environnemental. Séminaire d'animation scientifique, UMR Sol Agro&hydro système Spatialisation, INRA-Agrocampus Ouest, 13 juin 2005, Rennes (F), 21dia.
- [Cs3] **PAILLAT J.-M.**, 2005. Modélisation de la gestion des effluents d'élevage (acquis, perspectives, questions). Atelier « Décisions en agriculture et élevage : les pratiques de gestion des exploitations agricoles », CIRAD, 12-16 décembre 2005, Saint Pierre Réunion (F).
- [Cs4] GUERRIN F., MEDOC J.-M., **PAILLAT J.-M.**, 2006. Modélisation intégrée des pratiques et des flux pour l'aide à la gestion de systèmes agricoles – Gestion des effluents d'élevage à la Réunion. Atelier INRA-CIRAD, 22 juin 2006, Rennes (F).
- [Cs5] WALTER C., **PAILLAT J.-M.**, 2006. Gestion durable des effluents d'élevage : flux et processus du bâtiment au système sol-plante. Atelier INRA-CIRAD, 22 juin 2006, Rennes (F).
- [Cs6] **PAILLAT J.-M.**, FARINET J.L., THURIÈS L., CONDOM N., MONTANGE D., 2006. Transformations hors sol. Séminaire d'évaluation, UPR Recyclage et risque, CIRAD, 28-29 juin 2006, Montpellier (F), 17 dia.
- [Cs7] **PAILLAT J.-M.**, 2006. Meeting for an EU proposal on Environmental, social, and economical sustainable development of pig production in Cambodia, Laos, Philippines and Viet Nam. Nong Lam University, Ho Chi Minh city, Viêt Nam, 30/10 – 2/11/2006.
- [Cs8] HASSOUNA M., **PAILLAT J.-M.**, ROBIN P., 2007. Predicting ammonia and carbon dioxide emissions from carbon and nitrogen biodegradability during animal waste composting. 1 p.p. International Ammonia Conference in Agriculture, 19-21 March 2007, Ede, Netherlands. - s.l.:s.n., 2007.
- [Cs9] HASSOUNA M., ROBIN P., **PAILLAT J.-M.**, 2007. Multi-element combined methods increase the reliability of emission factor measurement. 1 p.p. International Ammonia Conference in Agriculture, 19-21 March 2007, Ede, Netherlands. -s.l.:s.n., 2007.
- [Cs10] **PAILLAT J.-M.**, 2007. Modélisation des processus de stabilisation de la matière organique et d'émissions gazeuses lors du compostage. Séminaire d'animation scientifique, UPR Recyclage et risque, CIRAD, 29 août 2007, Montpellier (F), 20 dia.
- [Cs11] **PAILLAT J.-M.**, ROBIN P., HASSOUNA M., 2008. Gaseous emissions from pig-on-litter systems - Composting (methods, measurements, models). Eager meeting, Wuelflingen, 23 to 25 January 2008.
- [Cs12] CORSON M., VAN DER WERF H., **PAILLAT J.-M.**, AUBIN J., HASSOUNA M., ROBIN P., 2008. Couplage des Modèles Dynamiques avec l'Analyse de Cycle de Vie. Séminaire modélisation, département PHASE, INRA, 10 mars 2008, Paris, 36 dia.

- [Cs13] **PAILLAT J.-M.**, FARINET J.L., 2008. Etude des facteurs physico-chimiques influençant les performances de l'imprégnation-compostage. Séminaire d'animation scientifique, UPR Recyclage et risque, CIRAD, 1er septembre 2008, Montpellier (F), 12 dia.
- [Cs14] **PAILLAT J.-M.**, 2009. Gestion des effluents d'élevage à l'échelle d'un territoire : cas des unités de traitement et des plans d'épandage collectifs. Séminaire d'animation scientifique, UPR Recyclage et risque, CIRAD, 21/05/09, Montpellier (F), 30 dia.
- [Cs15] **PAILLAT J.-M.**, 2009. Premiers éléments sur l'analyse des systèmes de production animale à l'échelle du territoire. Colloque du RMT Elevage et environnement, IFIP, 2009-05-13/2009-05-14, Rennes, France, 19 dia.
- [Cs16] **PAILLAT J.-M.**, LOPEZ-RIDAURA S., GUERRIN F., VAN DER WERF H., 2009. Territorialisation de l'activité agricole et gestion des ressources en effluents d'élevage – Faisabilité et évaluation environnementale d'un plan d'épandage collectif de lisier de porc. Premier atelier de prospective du RMT Fertilisation et environnement, 2009-09-24/2009-09-24, Paris, France.
- [Cs17] KANYARUSHOKI C., **PAILLAT J.-M.**, 2010. Etude prospective - Analyse des systèmes de production animale à l'échelle du territoire. Colloque du RMT Elevage et environnement, IFIP, 2010-10-21/2010-10-22, Rennes, France, 12 dia.
- [Cs18] OUDART D., PAUL E., ROBIN P., **PAILLAT J.-M.**, 2010. Modélisation de la stabilisation de la matière organique et des émissions gazeuses lors du compostage en andain. Application aux effluents avicoles de la Réunion : [Poster]. In : Journée des doctorants CAREN, 28 juin 2010, Rennes, France. s.l. : s.n., 1 p.. Journée des doctorants CAREN, 2010-06-28, Rennes, France.
- [Cs19] GUERRIN F., **PAILLAT J.-M.**, 2010. Modélisation intégrée des pratiques et des flux – Gestion collective de SPA, Séminaire final du projet ANR-06-PADD-017 SPA/DD « Systèmes de production animale et développement durable », Rennes, 3-4 juin 2010, 44 dia.
- [Cs20] **PAILLAT J.-M.**, MEDOC J.-M., 2010. Inventaire des sources et des puits au niveau d'une petite région agricole – Cas de la zone Petit et Grand Tampon, Ile de la Réunion. Séminaire intermédiaire du projet ANR-08-STRA-15 ISARD « Intensification écologique des systèmes de production agricoles par le recyclage des déchets », Dakar, 6-10 décembre 2010, 12 dia.
- [Cs21] **PAILLAT J.-M.**, OUDART D., 2010. Prise en compte du compostage dans les scénarios de gestion des PRO – Apport possible de la modélisation du procédé. Séminaire intermédiaire du projet ANR-08-STRA-15 ISARD « Intensification écologique des systèmes de production agricoles par le recyclage des déchets », Dakar, 6-10 décembre 2010, 11 dia.

I.3.4. Rapports

Rapports diplômant [Rd]

- [Rd1] **PAILLAT J.-M.**, 1983. Production de viande bovine : morosité en Bretagne, optimisme des Pays de Loire. Mémoire d'Ingénieur ISAB, CCAOF, Beauvais, 160 p. + annexes.
- [Rd2] **PAILLAT J.-M.**, 1995. Etude de l'ensilage en balles enrubannées sous climat tropical d'altitude - Cas des fourrages tempérés et tropicaux récoltés à l'île de La Réunion. Thèse de Doctorat de l'INA-PG, CIRAD, Paris, 300 p.

Rapports de recherche [Rr]

- [Rr1] **PAILLAT J.-M.**, 1990. Installation des prairies à La Réunion - Synthèse des actions de recherches conduites depuis 1986. Rapport CEEMAT, CIRAD, St Denis de La Réunion, 61 p.
- [Rr2] **PAILLAT J.-M.**, 1990. Récolte et conservation des fourrages à La Réunion - Synthèse des actions de recherches conduites depuis 1987. Rapport CEEMAT, CIRAD, St Denis de La Réunion, 44 p.
- [Rr3] **PAILLAT J.-M.**, 1990. Mécanisation des exploitations en zone de montagne à La Réunion - Synthèse des actions de recherches conduites depuis 1983. Rapport CEEMAT, CIRAD, St Denis de La Réunion, 55 p.

- [Rr4] **PAILLAT J.-M.**, 1993. Rapport CORDET 90-92 : ensilage en balles cylindriques enrubannées à La Réunion. Rapport final, CIRAD SAR, St Denis de La Réunion, 47 p.
- [Rr5] **PAILLAT J.-M.**, GALLO J.-Y., 1996. Analyse des flux de matières organiques dans la localité de Dos d'Ane. Rapport CIRAD SAR, St Denis de La Réunion, 38 p.
- [Rr6] FRABOULET P., JOURDE A., **PAILLAT J.-M.**, 1998. Etude du compostage du lisier de porc et de lapin sur différents supports carbonés en conditions tropicales. Rapport CIRAD TERA, St Denis de La Réunion, 17 p.
- [Rr7] **PAILLAT J.-M.**, 1998. Gestion des effluents d'élevage à La Réunion : transformer la nuisance en fertilité - Programme de recherche CORDET 94 DA 51 - Rapport final, CIRAD TERA, St Denis de la Réunion, 63 p.
- [Rr8] GUERRIN F., **PAILLAT J.-M.**, 1999. Mona Lise : modèle numérique-symbolique d'aide à la gestion de lisiers d'élevage. Rapport CIRAD TERA n° 34/99, St Denis de La Réunion, 99 p.
- [Rr9] RENAULT D., **PAILLAT J.-M.**, 1999. Analyse de la Production et de l'utilisation des effluents porcins à Grand Ilet, localité de l'île de La Réunion (cirque de Salazie). Rapport CIRAD TERA n° 16/99, St Denis de La Réunion, 51 p.
- [Rr10] GUERRIN F., LE GAL P.Y., LE PAGE C., LETERME P., **PAILLAT J.M.**, AUBRY C., CHABALIER P., PAPY F., RELIER J.P., DE TURCKHEIM E. 2000. Modélisation des flux de biomasse et des transferts de fertilité. Gestion des effluents d'élevage à la Réunion. Compte-rendu du second séminaire de l'ATP 99/60 : Maison Régionale des Sciences et de la Technologie, Saint-Denis, 25-31 octobre 2000. Saint-Denis : CIRAD-TERA, 21 p. Séminaire de l'ATP 99/60. 2, 2000-10-25/2000-10-31, Saint-Denis, Réunion.
- [Rr11] AUBRY C., **PAILLAT J.-M.**, GUERRIN F., 2001. Modélisation conceptuelle de la gestion des effluents d'élevage à la Réunion. Rapport CIRAD TERA n° 16/01, St Denis de la Réunion, 58 p.
- [Rr12] ROBIN P., **PAILLAT J.-M.**, HACALA S., 2001. Compostage des fumiers de litière accumulée de bovins. Estimation et caractérisation des pertes d'azote par volatilisation. Rapport final, convention IE-INRA 2000, UMR SAS, Rennes, 10 p.
- [Rr13] **PAILLAT J.-M.**, 2002. Effet du compostage d'effluents porcins sur les émissions gazeuses et les teneurs en éléments polluants. Rapport convention ADEME-INRA 2001, GIS Porcherie Verte, UMR SAS, Rennes, 6 p.
- [Rr14] **PAILLAT J.-M.**, AUBRY C., 2002. Construction d'une typologie fonctionnelle pour caractériser la gestion des effluents d'élevage dans les exploitations de l'île de la Réunion. Rapport CIRAD TERA n° 28/02, 23 p.
- [Rr15] DOORMAD J.Y., LEBRETON Y., MARTINEZ, J., PORTEJOIE S., MORVAN T., ROBIN P., **PAILLAT J.-M.**, 2004. Influence de l'alimentation sur le devenir des déjections porcines. Rapport final, action "Porcherie Verte" AC 32a. 29 p.
- [Rr16] LETERME P., **PAILLAT J.-M.**, 2004. Systèmes de culture et effluents d'élevage - Étude des dynamiques de l'azote en situations pédoclimatiques et culturales contrastées, recherche de voies d'optimisation. Rapport du projet n° 11, Fonds commun INRA-CIRAD, UMR SAS, Rennes, 14 p.
- [Rr17] **PAILLAT J.-M.**, ROBIN P., HASSOUNA M., 2004. Effet du compostage d'effluents porcins sur les émissions gazeuses - Influence de la biodégradabilité du carbone et de l'azote sur les émissions de gaz carbonique et d'ammoniac. Rapport convention ADEME-INRA 0275040, GIS Porcherie verte, UMR SAS, Rennes, 22 p.
- [Rr18] **PAILLAT J.-M.**, ROBIN P., HASSOUNA M., 2004. Bilan environnemental du procédé de compostage de lisier de porc sur paille suivant la méthode Guernévez® . Rapport intermédiaire convention ADEME-INRA 0375C0077, GIS Porcherie Verte, UMR SAS, Rennes, 34 p.
- [Rr19] VAYSSIERES J., GUERRIN F., **PAILLAT J.-M.**, MARTIN-CLOUAIRE R., RELIER J.-P., LECOMTE P., 2004. Modélisation conceptuelle des flux d'azote en exploitation d'élevage bovin laitier à la Réunion. Rapport CIRAD TERA N°15/04, La Réunion, 34 p.

- [Rr20] LEPETIT J., BARBET-MASSIN V., **PAILLAT J.-M.**, 2005. Compostage du fumier de bovin au champ : résultats de l'étude. Convention Union des AFP-Région Réunion, SICA-lait, Union des AFP, 43 p.
- [Rr21] **PAILLAT J.-M.**, ROBIN P., HASSOUNA M., LETERME P., 2005. Effet du compostage d'effluents porcins sur les émissions gazeuses et les teneurs en éléments polluants. Rapport final convention ADEME-INRA 0375C0077, GIS Porcherie Verte, UMR SAS, Rennes, 106 p.
- [Rr22] **PAILLAT J.-M.**, HASSOUNA M., ROBIN P., 2006. Abattements d'azote lors du compostage de fumier de vaches laitières : exemple de cinq élevages des Côtes d'Armor. Rapport d'étude pour le CORPEN, UMR SAS, Rennes, 11 p.
- [Rr23] ROBIN P., HASSOUNA M., LELEU C., RAMONET Y., **PAILLAT J.-M.**, 2006. Protocole de mesure simplifiée des émissions gazeuses en élevage d'engraissement de porcs sur litière en couche fine. Rapport d'étude. UMR SAS, Rennes, 22 p.

Rapports d'expertise [Re]

- [Re1] **PAILLAT J.-M.**, 1999 (*CEE*). Support for the project « Erosion control on the island of Rodrigues » Evaluation of livestock husbandry and proposals for action. A visit made to Rodrigues island from 26 October to 5 November 1999. Rapport CIRAD TERA n° 92/99, Montpellier, 26-2 p.
- [Re2] CABIDOCHÉ Y.-M., DOREL M., **PAILLAT J.-M.**, ROBIN P., 2001 (*ministère*). Inventaire des données scientifiques et techniques disponibles dans les DOM insulaires, relatives à la fertilisation azotée des cultures, à leur conduite, au fonctionnement des aquifères et aux phénomènes de transfert d'azote dans le milieu et leur incidence. Rapport INRA, Ministère de l'Aménagement du Territoire et de l'Environnement, 68 p.
- [Re3] **PAILLAT J.-M.**, 2006 (*ministère Polynésie française*). Etude des techniques de gestion et de valorisation des effluents porcins pour le Centre d'insémination et de multiplication d'Opunohu (île de Moorea) du Service du Développement Rural de Polynésie française. Mission réalisée du 27 au 31 mars 2006. Rapport CIRAD-CA, Montpellier, 38 p.
- [Re4] **PAILLAT J.-M.**, 2009 (*RMT élevage et environnement*). Etude prospective : Méthodes d'évaluation des systèmes de production animale à l'échelle du territoire – Rapport intermédiaire au 30/04/2009. Réseau Mixte Technologique Elevage et environnement, UMR SAS, Rennes, 15 p.
- [Re5] **PAILLAT J.-M.**, 2010 (*RMT élevage et environnement*). Etude prospective : Méthodes d'évaluation des systèmes de production animale à l'échelle du territoire – Rapport intermédiaire au 20/01/2010. Réseau Mixte Technologique Elevage et environnement, UMR SAS, Rennes, 31 p.

I.3.5. Autres documents

Documents d'animation [Da]

- [Da1] MANDRET G., **PAILLAT J.-M.**, 1993. Rapport de mission en Nouvelle-Calédonie du 19 au 26 février 1993. Rapport CIRAD Elevage, St Pierre de La Réunion, 29 p.
- [Da2] **PAILLAT J.-M.**, PERRET S., TASSIN J., 1996. Projet de pôle environnement du CIRAD à La Réunion. CIRAD, St Denis de La Réunion, 19 p.
- [Da3] **PAILLAT J.-M.**, 1999. Gestion de la matière organique agricole au niveau de l'exploitation agricole et du territoire à travers l'étude du compostage des effluents d'élevage. Projet de recherche, CIRAD TERA, St Denis de La Réunion, 6 p.
- [Da4] **PAILLAT J.-M.**, LETERME P., 2001. Étude des cycles biogéochimiques dans les sols de La Réunion soumis à l'épandage d'effluents d'élevage. Projet de rapprochement INRA-CIRAD, atelier de travail des 21 et 22 mai 2001, UMR SAS, INRA, Rennes, 2 p. + 10 fichiers pdf (communications).

- [Da5] **PAILLAT J.-M.**, LETERME P., GUERRIN F., 2003. Point sur le rapprochement INRA-CIRAD autour de la problématique de la gestion des effluents d'élevage. Note de bilan et perspectives, CIRAD-INRA, UMR SAS, Rennes, 9 p.
- [Da6] **PAILLAT J.-M.**, 2004. Conception et utilisation de modèles pour la gestion des matières organiques aux niveaux de l'exploitation agricole et du territoire. Projet de recherche, CIRAD-INRA, UMR SAS, Rennes, 5 p.
- [Da7] **PAILLAT J.-M.**, GASCUEL C., 2006. Visite du CIRAD à l'UMR SAS le 22 juin 2006 – Programme et compte rendu des discussions. UMR SAS, INRA, Rennes, 3 p. + 9 fichiers pdf (communications).
- [Da8] MEDOC J.-M., PORPHYRE V., **PAILLAT J.-M.**, 2006. Approche pluridisciplinaire et intégrée du développement durable de la production porcine dans le delta du fleuve Rouge au Vietnam - Synthèse de l'atelier de travail des 5 et 6 septembre 2006, Agropolis, CIRAD, Montpellier, 6 p.
- [Da9] **PAILLAT J.-M.**, GAY F., LANGLAIS C., PORPHYRE V., 2006. Compte rendu du meeting « Environmental, social, and economical sustainable development of pig production in Cambodia, Laos, Philippines and Viet Nam », Nong Lam University, Ho Chi Minh City, CIRAD, 4 p.
- [Da10] **PAILLAT J.-M.**, 2006. Conception et utilisation de modèles de simulation pour la gestion des matières organiques aux niveaux exploitation et territoire et évaluation environnementale des systèmes de production animale. Projet de recherche, CIRAD-INRA, UMR SAS, Rennes, 7 p.
- [Da11] FARINET J.-L., **PAILLAT J.-M.**, 2006. Bilan de l'imprégnation de lisier de porc sur paille de blé. In : rapport d'évaluation UPR Recyclage et risque, CIRAD, Montpellier, pp 51-53.
- [Da12] GUERRIN F., **PAILLAT J.-M.**, 2006. Généralisation : modélisation intégrée des pratiques et des flux dans les systèmes de production. In : rapport d'évaluation UPR Recyclage et risque, CIRAD, Montpellier, pp 66-69.
- [Da13] GUERRIN F., **PAILLAT J.-M.**, 2006. Mafate : modélisation et analyse de flux à l'échelle d'exploitations et de territoires. In : rapport d'évaluation UPR Recyclage et risque, CIRAD, Montpellier, pp 61-64.
- [Da14] **PAILLAT J.-M.**, 2006. Compostage de fumier de bovins sur paille de canne à sucre. In : rapport d'évaluation UPR Recyclage et risque, CIRAD, Montpellier, pp 54-55.
- [Da15] **PAILLAT J.-M.**, 2006. Modélisation des émissions gazeuses lors du compostage et compréhension des processus. In : rapport d'évaluation UPR Recyclage et risque, CIRAD, Montpellier, pp 55-56.
- [Da16] **PAILLAT J.-M.**, FARINET J.-L., 2006. Compostage des effluents d'élevage. In : rapport d'évaluation UPR Recyclage et risque, CIRAD, Montpellier, pp 50-51.
- [Da17] SAINT MACARY H., **PAILLAT J.-M.**, FEDER F., FINDELING A., 2006. Lixiviation des nitrates et volatilisation de l'ammoniac. In : rapport d'évaluation UPR Recyclage et risque, CIRAD, Montpellier, pp 38-42.
- [Da18] **PAILLAT J.-M.**, 2007. Effet du compostage d'effluents porcins sur les émissions gazeuses et les teneurs en éléments polluants : influence de 4 paramètres sur les émissions gazeuses. Fiche de synthèse GE-8, GIS Porcherie Verte, INRA, Paris, 2 p.
- [Da19] **PAILLAT J.-M.**, 2007. Effet du compostage d'effluents porcins sur les émissions gazeuses et les teneurs en éléments polluants : évaluation d'un procédé de compostage du lisier avec de la paille. Fiche de synthèse GE-9, GIS Porcherie Verte, INRA, Paris, 2 p.

Documents à vocation pédagogique [Dp]

- [Dp1] **PAILLAT J.-M.**, 1989 (*profession*). Travail du sol - tome 2. Document de formation, CEEMAT, CIRAD, Montpellier, 142 p.
- [Dp2] **PAILLAT J.-M.**, 2004 (*étudiants ingénieurs*). Relation agriculture élevage et protection de l'environnement en contexte tropical - Cas de l'île de la Réunion - Analyse de la complémentarité des systèmes de production à différentes échelles et niveaux d'organisation : exploitation agricole (niveau individuel) et territoire (niveau collectif). 2^{nde} année du module agriculture tropicale, Agrocampus, Rennes, 56 diapositives.

- [Dp3] **PAILLAT J.-M.**, 2005 (*étudiants ingénieurs*). Compostage des matières organiques d'origine animale - Bilan environnemental. Master 2- module recyclage des déchets, Agrocampus, Rennes, 50 diapositives.
- [Dp4] **PAILLAT J.-M.**, 2006 (*ingénieurs-chercheurs*). Compostage : processus et paramètres de contrôle – Impact environnemental. Formation « Impact agronomique et environnemental de la gestion des matières organiques – Application aux pays du Sud », 16-20 oct. 2006, CIRAD, Montpellier, France, 27 diapositives.
- [Dp5] **PAILLAT J.-M.**, 2006 (*étudiants ingénieurs*). Compostage des matières organiques d'origine animale - Bilan environnemental. Master 2 et Ingénieurs DAA - module recyclage des déchets, Agrocampus, Rennes, 53 diapositives.
- [Dp6] **PAILLAT J.-M.**, 2008 (*ingénieurs-chercheurs*). Compostage : processus et moyens de contrôle – Impact environnemental. Cours UVED « Impact agronomique et environnemental de la gestion des matières organiques – Application aux pays du Sud », CIRAD, Montpellier, France, 34 diapositives, enregistrement sous Speechi.
- [Dp7] LETERME P., **PAILLAT J.-M.**, 2008 (*étudiants ingénieurs*). Gestion agronomique des effluents d'élevage. Ingénieurs DAA niveau M1 – module techniques culturelles, Agrocampus, Rennes, 43 diapositives.
- [Dp8] **PAILLAT J.-M.**, LETERME P., 2010 (*étudiants M2*). Gestion agronomique des effluents d'élevage. Master EPSSED – UM2-Cirad, Montpellier, 47 diapositives.
- [Dp9] **PAILLAT J.-M.**, 2009 (*étudiants > L3*). Compostage des matières organiques d'origine animale : bilan environnemental - Le recyclage agricole des déchets – Gestion des déchets. Cours numérique en ligne ENVAM, Rennes, 11 p.

Logiciels enregistrés [Le]

- [Le1] GUERRIN F., **PAILLAT J.-M.**, 2009. Logiciel Magma.
IDDN.FR.001.130018.000.S.P.2009.000.30100, Certificat, Agence pour la protection des programmes.
- [Le2] GUERRIN F., **PAILLAT J.-M.**, 2009. Logiciel Comet.
IDDN.FR.001.130017.000.S.C.2009.000.30100, Certificat, Agence pour la protection des programmes.

I.4. Travaux encadrés

I.4.1. Thèses de doctorat (co-encadrement) [Tt]

[Tt1] HELIAS A., 2003. Agrégation/abstraction de modèles pour l'analyse et l'organisation de réseaux de flux – Application à la gestion des effluents d'élevage à la Réunion. Thèse de doctorat, spécialité Génie des procédés, ENSAM, Montpellier, 275 p.

Soutenance le 18 décembre 2003 devant le jury composé de Marie-Odile CORDIER et Robert VALETTE, rapporteurs, Jean-Philippe STEYER, directeur de thèse, François GUERRIN et Philippe LETERME, examinateurs, Jean-Marie NAVARRO, président, ainsi que Christine AUBRY, Roger MARTIN-CLOUAIRE et **Jean-Marie PAILLAT** en qualité de membres invités.

J'ai participé à l'encadrement de la partie applicative de la thèse (dernier chapitre).

[Tt2] ABD EL KADER N., 2004. Intérêt environnemental et agronomique d'une gestion conservatoire de l'azote et du carbone lors du compostage d'effluents d'élevage. Thèse de doctorat, Agrocampus, Rennes, 117 p.

Soutenance le 28 juin 2004 devant le jury composé de Bernard GODDEN, président, José MARTINEZ et Philippe MORAND, rapporteurs, Claude AUBERT, examinateur et Philippe LETERME, directeur de thèse.

L'équipe d'encadrement rapproché de cette thèse était constituée de Philippe LETERME, Safia MENASSERI, **Jean-Marie PAILLAT** et Paul ROBIN.

[Tt3] VAYSSIERES J., 2008. Modélisation participative et intégration des pratiques décisionnelles d'éleveurs dans un modèle global d'exploitation - Application à l'évaluation de la durabilité des élevages laitiers d'une île tropicale. Thèse de doctorat, Supagro, Montpellier, 179 p.

Soutenance le 28 mars 2008 devant le jury composé de Jean LOSSOUARN, président, Jean-Yves DOURMAD et Michel DURU, rapporteurs, Jacques WERY, examinateur, François BOCQUIER, directeur de thèse, ainsi que François GUERRIN et Philippe LECOMTE, co-directeurs de thèse, en qualité de membres invités.

J'ai participé à 2 comités de thèse et à l'encadrement de la conception des modules biophysiques du modèle Gamède : « émissions gazeuses au stockage et au compostage » et « récolte et conservation des fourrages ».

[Tt4] CHARDON X., 2008. Evaluation environnementale des exploitations laitières par modélisation dynamique de leur fonctionnement et des flux de matière au sein du système : développement et application du simulateur MELODIE. Thèse de doctorat AgroParisTech, Paris, 282 p.

Soutenance le 10 octobre 2008 devant le jury composé de Daniel SAUVANT, président, Gilles LEMAIRE et Philippe LECOMTE, rapporteurs, Frédéric GARCIA et André LE GALL, examinateurs, et Philippe FAVERDIN, directeur de thèse.

J'ai participé à 3 comités de thèse et à l'encadrement de la conception du modèle Mélodie (architecture générale, modules sol-plantes et bâtiments-stockage-transformation).

[Tt5] RIGOLOT C., 2009. Modélisation de l'impact environnemental des pratiques en élevage porcin à l'échelle sectorielle (animal et effluent), de l'exploitation et du cycle de vie (ACV). Thèse de doctorat Agrocampus-Ouest, Rennes, 184 p.

Soutenance le 18 mai 2009 devant le jury composé de Catherine DISENHAUS, présidente, François GUERRIN et Baudouin NICKS, rapporteurs, Philippe LETERME et Sandrine ESPAGNOL, examinateurs, et Jean-Yves DOURMAD, directeur de thèse.

J'ai participé à la conception du module bâtiments-stockage-transformation du modèle Mélodie et au référentiel sur les émissions gazeuses au compostage utilisé par ce modèle.

Encadrement de thèse en cours :

LOUDART D. Modélisation de la stabilisation de la matière organique et des émissions gazeuses dans les procédés de transformation hors sol. Application au compostage des effluents avicoles de la Réunion.

Démarrage le 2 novembre 2009, soutenance prévue en 2012 ; j'assure le co-encadrement de cette thèse avec Etienne Paul (Pr INSA Toulouse) et Paul Robin (UMR Inra Agrocampus Ouest Sol Agro&hydro système Spatialisation Rennes) et assure également la responsabilité scientifique de l'accueil au CIRAD. Cette thèse est financée par Crête d'Or Entreprise (production, transformation et

commercialisation des produits avicoles de la Réunion) en convention CIFRE. Le comité de thèse est composé de E. Paul, J.-M. Paillat, P. Robin, C. Aubert (Ing. ITAVI), A. Collignan (Pr Supagro), P. Garnier (CR INRA), J.P. Steyer (DR INRA).

Participation aux comités de thèse suivants :

LUTH. Rôle des lombriciens dans le déterminisme des émissions gazeuses d'un lombrifiltre associé à une porcherie.

Thèse réalisée à l'Université de Rennes I, UMR ECOBIO, soutenance prévue en 2011.

ZENG Y. Etude des voies de réduction des émissions d'ammoniac et de protoxyde d'azote lors du traitement par compostage de déchets organiques et de digestats de méthanisation.

Thèse réalisée au CEMAGREF de Rennes, UPR GERE, soutenance prévue en 2011.

DHAOUADI K. Modélisation conceptuelle de la gestion territoriale des MO en Ile de France.

Thèse réalisée à l'INRA de Paris, UMRs SADAPT et EGC, soutenance prévue en 2012.

AFOUTNI Z. Modélisation de l'activité humaine et pilotage des flux de matières dans les systèmes de production agricoles - Application au recyclage de coproduits organiques.

Thèse réalisée au CIRAD de la Réunion, UPR Recyclage et risque, soutenance prévue en 2012.

RABETOKOTANY N. Matières organiques issues de l'élevage et de la ville en milieu tropical : apports de la spectrométrie proche infra-rouge (SPIR) pour orienter leurs usages agronomiques et/ou énergétiques.

Thèse réalisée au CIRAD de la Réunion, UPR Recyclage et risque, soutenance prévue en 2013.

I.4.2. Mémoires de stages niveau M2 : ingénieurs, DAA, DEA, DESS [Tm]

[Tm1] ARNOLD F., 1984. Capacité de traction de cellules motrices de faible puissance dans les Hauts de l'Ouest de la Réunion. Mémoire d'ingénieur ISTOM, CEEMAT, Le Havre, 77 p.

[Tm2] ADJIRI E., 1991. Modélisation du comportement de quelques cellules motrices pour le transport en zone de montagne réunionnaise. Mémoire d'ingénieur ESAT, CNEARC, CIRAD, Montpellier, 52 p.

[Tm3] REYNAUD S., 1995. Diagnostic des pratiques agricoles pour une meilleure compréhension des transferts d'effluents d'élevage. Mémoire de DAA, INA-PG, CIRAD, Paris, 58 p.

[Tm4] THIERY M., 1995. Mise au point d'une unité de compostage de déchets d'abattoirs de volailles en zone de montagne de La Réunion. Mémoire d'ingénieur ITIA, CNAM – INA-PG, Chambre d'Agriculture de La Réunion, Paris, 57 p.

[Tm5] DELATTRE F., 1996. Analyse des pratiques et stratégies de gestion des stocks fourragers chez les éleveurs de bovins laitiers de La Réunion. Mémoire de DAA, INA-PG, CIRAD, Paris, 54 p.

[Tm6] FONTAINE M., 1997. Analyse des stratégies d'alimentation dans les systèmes d'élevage laitier des Hauts de la Réunion. Mémoire d'ingénieur EITARC, CNEARC, CIRAD, Montpellier, 92 p.

[Tm7] CHOLLET S., 1998. Flux d'azote dans les exploitations laitières - Relations avec les pratiques et conséquences sur la gestion des effluents dans la filière laitière. Mémoire de DAA, ENSAR, CIRAD, Rennes, 54 p.

[Tm8] PRECHEUR H., 1999. Gestion des effluents d'élevages du sud de la Réunion - Constitution d'un modèle d'action. Mémoire de DAA, ENSAR, CIRAD, Rennes, 52 p.

[Tm9] RAKOTOMALALA L., 1999. Etude de la gestion de la matière organique en productions végétales dans le sud de l'île de la Réunion – Analyse des pratiques et constitution d'un modèle d'action. Rapport de DESS Gestion des systèmes agro-sylvo-pastoraux en zones tropicales, université Paris XII, CIRAD, Créteil, 55 p.

[Tm10] RICHARD S., 2000. Adaptation du procédé Agrifiltre® à la paille de canne à sucre. Mémoire d'ingénieur EME, CIRAD, Rennes, 48 p.

[Tm11] FERNANDEZ C., 2001. Cinétique de minéralisation du carbone et de l'azote sur sols de la Réunion. Mémoire d'ingénieur ISTOM, CIRAD, Cergy-Pontoise, 78 p.

- [Tm12] RAUX S., 2001. Caractérisation des déchets organiques sous climat tropical à la Réunion. Mémoire d'ingénieur ESA, CIRAD, Angers, 77 p.
- [Tm13] SANSOULET J., 2001. Volatilisation d'ammoniac suite à l'épandage de lisier sur mulch de paille de canne à sucre et sur prairie d'altitude. Mémoire d'ingénieur ESAP, CIRAD, Purpan, 60 p.
- [Tm14] COMONT L., 2002 Relation entre l'émission ammoniacale d'un compost et la teneur en azote ammoniacal du produit initial. Mémoire de DEA National de Science du Sol, INPL-ENSAIA, UMR SAS, Rennes, 20 p.
- [Tm15] LUTH, 2003. Etude de l'influence de la dégradabilité du carbone d'effluents d'élevage sur les émissions gazeuses durant le compostage. Mémoire de DEA National de Science du sol, ENSAR, UMR SAS, Rennes, 28 p.
- [Tm16] EMONET-DENAND V., 2005. Typologie fonctionnelle des exploitations porcines de la Province de Thai Binh basée sur le risque environnemental généré par les effluents d'élevages porcins - Delta du Fleuve Rouge, Nord Vietnam. Mémoire de DAA, INA-PG, CIRAD, Paris, 113 p.
- [Tm17] DELTOUR L., 2007. Evaluation environnementale de différents modes de gestion de lisier de porc à l'aide de l'Analyse du Cycle de Vie. Mémoire de DAA, ENESAD, Dijon, 113 p.
- [Tm18] MANAC'H G., 2007. Amélioration des techniques de transformation des produits organiques solides issus des élevages de porcs et destinés au marché – Essai de compostage par aération forcée. Mémoire d'ingénieur, ESITPA, Le Val de Reuil, 119 p.
- [Tm19] VALMAR N., 2009. Utilisation d'un modèle multiagents : gestion collective des effluents d'élevage du territoire du petit Tampon et Grand Tampon (La Réunion). Mémoire Master II STIC, Université de la Réunion, S^t Denis de la Réunion, 28 p.
- [Tm20] BRAC DE LA PERRIERE F., FOUQUE P.E., MARESCHAL C., PASQUIOU V., PERROT C., 2009. Synthèse des connaissances concernant l'évaluation des systèmes de production animale à l'échelle du territoire. Rapport de DA Environnement et Aménagement, Ecole Supérieure d'Agriculture, Angers, 47 p. + annexes.
- [Tm21] SALIFOU N., 2009. Méthodes d'analyse de la durabilité des SPA à l'échelle du territoire : synthèse des connaissances, manques et besoins – Définition d'une méthode d'analyse de la durabilité des SPA à l'échelle du territoire et prise en compte du territoire dans les projets. Mémoire Master II Ingénierie environnementale, option SPDR, Agrocampus Ouest, Rennes, 64 p. + annexes.
- [Tm22] MONTFORT C., 2010. Conception d'une méthode type d'évaluation de la durabilité des Systèmes de Production Animale (SPA) à l'échelle du territoire. Proposition de projet à soumettre au CASDAR. Rapport de Mastère Juturna, Ecole Supérieure d'Agriculture, Angers, 19 P.

I.4.3. Mémoires de maîtrise niveau M1 [Tm]

- [Tm23] SINGAINY E., 1992. Compréhension des phénomènes d'échanges gazeux intervenant dans les balles enrubannées - Etalonnage sur fût étanche. Rapport de maîtrise de physique et applications, Université de La Réunion, CIRAD, S^t Denis de La Réunion, 25 p.
- [Tm24] NOUROUDINE A.-T., 1995. Evaluation du degré de maturité des composts. Rapport de maîtrise de chimie et biologie végétale, Université de La Réunion, CIRAD, S^t Denis de La Réunion, 63 p.
- [Tm25] HELENE B., 1996. Mise en œuvre d'un dispositif de respirométrie. Mémoire de maîtrise de physiques et applications, Université de La Réunion, CIRAD, S^t Denis de La Réunion, 22 p.
- [Tm26] ONALY A., 1997. Evaluation de l'innocuité d'un amendement organique en conditions tropicales. Propositions de méthodes pour la détermination de seuils de maturité de composts produits à la Réunion. Mémoire de maîtrise des sciences et techniques, Université de la Réunion, CIRAD, S^t Denis de la Réunion, 38 p.
- [Tm27] COLLIGNON N., 2004. Etude de la dessiccation de produits fermentescibles. Mémoire de 2^{nde} année ingénieur, Ecole des Métiers de l'Environnement, UMR SAS, Bruz, 45 p.

I.5. Positionnement scientifique

I.5.1. Contexte et historique des recherches

Recruté au CIRAD en janvier 1985 à la Réunion après 16 mois de volontariat à l'aide technique, j'ai tout d'abord mis en place des expérimentations dans le domaine de la mécanisation des exploitations, puis très rapidement dans le domaine de l'élevage (production et gestion des fourrages). Partant de ces premiers résultats, en 1990, j'ai construit une problématique de recherche sur la conservation des ressources fourragères, l'objectif étant d'en améliorer la gestion dans le temps, et préparé une thèse de doctorat, soutenue à l'INA-PG²⁵ en 1995 (cf. § II.2.1. du mémoire des travaux). Tout en poursuivant la valorisation de mes travaux sur les ressources fourragères, j'ai progressivement orienté mes recherches vers la gestion des effluents d'élevage et, plus généralement, vers l'évaluation environnementale des pratiques d'élevage, thème alors peu présent dans les recherches menées au CIRAD (cf. § II.2.2. du mémoire des travaux).

A partir de 1999, les travaux, menés dans le cadre de l'action thématique programmée (ATP 99/60)²⁶ que j'ai coordonnée avec F. Guerrin (INRA mis à disposition du CIRAD), ont structuré mes recherches autour de (1) la conception et l'utilisation de modèles de simulation pour la gestion des matières organiques aux niveaux exploitation et territoire (cf. § II.3.1. du mémoire des travaux), et (2) l'évaluation environnementale des systèmes de production animale (cf. § II.3.2. et II.3.3. du mémoire des travaux).

En 2002, lors de la restitution des travaux de l'ATP, les trois principales recommandations du comité de pilotage (Jean-Pascal Pichot, président, Jean-Marie Attonaty, Patrick Caron, Elisabeth De Turkheim, Philippe Leterme, Eric Malézieux, Roger Martin-Clouaire, Jacques Meunier) étaient (1) la nécessité d'utiliser les modèles de gestion produits, (2) l'intégration de processus biophysiques dans les modèles de gestion pour aboutir à une réelle évaluation environnementale des systèmes et (3) l'établissement de fonctions biophysiques simplifiées pour simuler les flux vers l'environnement.

Ainsi, s'agissant de la 1^{ère} recommandation, l'utilisation des modèles produits dans l'ATP 99/60 a été réalisée dans le cadre du projet SPA/DD (ANR-06-PADD-017), en Bretagne avec l'utilisation du modèle COMET²⁷ (cf. § II.3.3. du mémoire des travaux) et à la Réunion avec l'utilisation du modèle BIOMAS²⁸ (collaboration CIRAD et université de la Réunion). Ce thème a également été traité en 2003-2004 dans le cadre d'une action du GIS²⁹ Porcherie Verte visant l'utilisation des modèles MACSIZUT³⁰, APPROZUT³¹ et BIOMAS pour la gestion de lisier porcin sur le territoire de Grand Ilet à la Réunion. Il était au cœur de la thèse de Jean-Michel Médoc intitulée « Utilisation de modèles pour élaborer des stratégies de gestion individuelle et collective des effluents d'élevage ». La thèse a été interrompue consécutivement à l'avis du 3^{ème} comité de thèse de juin 2007, puis au changement d'affectation de Jean-Michel Médoc début 2008.

Pour prendre en compte la 2^{nde} recommandation, j'ai contribué au développement de modèles pour intégrer des variables de gestion et des variables simulant les processus biophysiques. D'une part, à partir du modèle MAGMA³² développé dans l'ATP 99/60 (cf. § II.3.1. du mémoire des travaux), le travail de modélisation a été élargi à l'ensemble des flux d'azote au sein de l'exploitation bovin lait de la Réunion (cf. § II.3.2. du mémoire des travaux), grâce à la thèse de J. Vayssières dont j'ai participé à

²⁵ Institut National Agronomique Paris-Grignon

²⁶ ATP 99/60 : Modélisation des flux de biomasse et des transferts de fertilité – Cas de la gestion individuelle et collective des effluents d'élevage à la Réunion.

²⁷ Collective management of effluents on a territory scale ; ce modèle développé par François Guerrin, Santiago Lopez-Ridaura et Jean-Marie Paillat [Ci28] au sein de l'UPR recyclage et risque du CIRAD et de l'UMR SAS représente la gestion collective d'un plan d'épandage de lisier porcin en Ile et Vilaine

²⁸ Modèle multi-agents pour l'aide à la gestion de biomasse agricole ; ce modèle développé par le LIM (laboratoire d'informatique et de mathématiques de l'université de la Réunion) en collaboration avec l'UPR Recyclage et risque du CIRAD (François Guerrin, Jean-Marie Paillat, Jean-Michel Médoc) [Ai2] représente les échanges de matières organiques entre exploitations à l'échelle d'un territoire

²⁹ Groupement d'Intérêt Scientifique

³⁰ Modèle d'aide au choix par simulation d'unités de traitement ; ce tableau développé par Jean-Luc Farinet et Jean-Marie Paillat (UPR Recyclage et risque) et Yvan Hurvois (Agence de l'eau Loire Bretagne) [Ca9] permet de dimensionner différents procédés de traitement du lisier porcin et de calculer les coûts d'investissement et de fonctionnement de l'installation de traitement

³¹ Modèle de simulation de l'approvisionnement d'unités de traitement ; modèle développé par François Guerrin (UPR Recyclage et risque) (2004, cf. note 108) pour simuler l'approvisionnement d'une unité de traitement de lisier de porc

³² Modèle d'aide à la gestion des matières organiques en agriculture ; modèle développé par François Guerrin (2001, cf. note 82) et Jean-Marie Paillat (UPR Recyclage et risque) pour simuler la gestion des matières organiques dans une exploitation d'élevage

l'encadrement (UPR Système d'élevage – financement ADEME³³). Cette démarche a également été adoptée dans le projet MELODIE³⁴ (financement ACTA³⁵ – thèses CIFRE³⁶ de Xavier Chardon et Cyrille Rigolot dont j'ai participé à l'encadrement) associant les UMRs PL, SENAH et SAS de l'INRA et les instituts techniques (IE et IFIP). D'autre part, suite à la sollicitation de la chambre d'agriculture d'Ille et Vilaine pour aider à la gestion de plans d'épandage collectif, deux actions ont été engagées : (1) l'évaluation environnementale du plan d'épandage collectif du GIE³⁷ Terre-Eau en comparaison avec un traitement collectif, en utilisant l'ACV³⁸, (2) la réalisation du modèle COMET simulant les transferts d'effluents entre exploitations pour tester la faisabilité du plan d'épandage et mieux évaluer les flux émis vers l'environnement. Ces travaux ont également contribué au projet SPA/DD (cf. § II.3.3. du mémoire des travaux).

Concernant la 3^{ème} recommandation, la transformation des effluents d'élevage par compostage est apparue comme un moyen d'améliorer leur gestion dans le temps et l'espace ; cependant, peu de travaux suffisamment génériques avaient été conduits. Des expérimentations, financées par l'ADEME dans le cadre du programme Porcherie Verte, ont donc été menées de 2002 à 2005 à l'UMR SAS (thèse de Nasser Abd El Kader soutenue en 2004 et que j'ai co-encadrée). Dans un premier temps, la modélisation empirique a été privilégiée pour prédire de façon simple les émissions gazeuses (cf. § II.2.2. du mémoire des travaux). Les données acquises permettent d'envisager l'élaboration et le paramétrage d'un modèle mécaniste qui font l'objet de la thèse CIFRE de Didier Oudart, financée par Crête d'Or Entreprise (industriel de la production, transformation et commercialisation des produits avicoles à la Réunion). Ce travail contribuera au projet ISARD.

I.5.2. Objectifs de recherche

Ainsi, comme illustré par l'historique de mes activités et s'appuyant sur les collaborations scientifiques mises en place, ma problématique de recherche se décline en 3 opérations liées, ayant comme objet général d'étude l'interface entre productions végétale et animale. Ces opérations couvrent aussi bien des questions analytiques (compréhension des processus d'émissions gazeuses au compostage en vue de leur modélisation) que systémiques (modélisation des transferts de biomasse entre unités de production et de consommation et utilisation des modèles pour l'évaluation environnementale de stratégies de gestion). Cette articulation entre approches analytique et systémique est au cœur de mes recherches et de celles de mon unité de rattachement au CIRAD.

Opération 1. Evaluation environnementale des systèmes d'élevage

Cette opération contribue au thème « Elaboration et évaluation de stratégies de gestion des matières organiques » de l'UPR Recyclage et risque (collaboration avec J.M. Médoc et F. Guérin) et au thème « Evaluation environnementale des systèmes agricoles et conception de nouveaux systèmes » de l'UMR SAS (collaboration avec H. van der Werf et M. Corson). Ma participation concerne le paramétrage de situations réalistes (scénarios, stratégies de gestion), la méthodologie de simulation et l'interprétation des résultats de simulation au regard d'indicateurs agronomiques et environnementaux.

Les modèles dynamiques de simulation ont pour objectif de tester différents scénarios de production agricole, basés sur des cas types ou des cas réels, ou différentes stratégies de gestion des effluents avec une finalité d'aide à la décision. Les simulations faites au laboratoire ou avec les acteurs agricoles doivent permettre, en principe, de modifier leur expertise sur le système modélisé. Les questions de recherche concernent (1) la validation des modèles de simulation par l'observation du réel ou par l'usage, (2) l'articulation de ces modèles avec l'utilisation de méthodes d'évaluation environnementale multicritères (ACV par exemple), et (3) l'évaluation des scénarios, stratégies et pratiques définis avec ou par les acteurs.

³³ Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie

³⁴ Modélisation de l'exploitation d'élevage en langage objet pour le diagnostic des impacts environnementaux

³⁵ Association de Coordination des Techniques Agricoles

³⁶ Convention Industrielle de Formation par la REcherche

³⁷ Groupement d'Intérêt Economique

³⁸ Analyse du Cycle de Vie

Opération 2. Modélisation des flux de biomasse

Menée en collaboration avec plusieurs unités de recherche du CIRAD (P. Lecomte et J. Vayssières, UPR Systèmes d'élevage, F. Guerrin UPR Recyclage et risque) et de l'INRA (UMRs PL, SENAH et SAS), cette opération contribue au thème « Modélisation du fonctionnement des systèmes de production agricole » de l'unité Recyclage et risque et au thème « Evaluation environnementale des systèmes agricoles et conception de nouveaux systèmes » de l'UMR SAS. Ma contribution concerne la modélisation conceptuelle et l'intégration de connaissances sur la gestion des effluents, les émissions gazeuses lors de leur transformation et la conservation des fourrages.

Les systèmes de production animale (SPA) sont complexes par les interrelations entre les activités de production végétale et de production animale. A l'interface entre ces sous-systèmes, l'éleveur gère des stocks et des flux d'aliments ou d'effluents. Par ailleurs, la plupart des SPA dépendent, au sein d'un territoire, d'approvisionnements extérieurs (engrais, aliments, paille) et de transferts vers d'autres SPA (effluents, animaux). Pour étudier ces systèmes complexes, évaluer leurs impacts sur l'environnement et tester leur adaptation dans différents contextes agronomiques et réglementaires existants ou possibles, le recours à la modélisation est nécessaire. Celle-ci doit intégrer des variables de gestion (planification et pilotage par les éleveurs) et des variables caractérisant les processus biophysiques.

Opération 3. Bilan environnemental du procédé de compostage

Conduite en collaboration avec P. Robin et M. Hassouna (UMR SAS) et avec J.L. Farinet et L. Thuriès (UPR Recyclage et risque), cette opération contribue au thème 1b « Etude de l'amélioration du recyclage de matières organiques ou de déchets par des transformations hors sol » de l'unité Recyclage et risque et au thème « Effets agronomiques et environnementaux de l'utilisation des effluents d'élevage » de l'UMR SAS. Au sein de ces deux unités, j'ai animé les recherches sur la thématique du compostage.

Le compostage des effluents est une technique permettant de mieux gérer dans le temps et l'espace les matières organiques produites par les élevages. Cependant, les transformations de la MO durant ce procédé conduisent à des pertes importantes. Des gaz nocifs pour l'environnement sont émis : NH_3 responsable de l'acidification du milieu, CO_2 , CH_4 et N_2O qui sont des gaz à effet de serre. Face à la multiplicité des types d'effluents et des conditions de compostage, l'objectif des recherches est de modéliser les pertes gazeuses et l'évolution de la composition des produits, en étudiant des situations très contrastées en regard des principaux facteurs de contrôle du compostage : C biodégradable, N disponible, oxygène, humidité.

II. Mémoire des travaux de recherche

II.1. Introduction : de l'approche par les techniques à l'analyse systémique des systèmes d'élevage et à leur modélisation pour en évaluer la performance agronomique et environnementale

Mes activités de recherche se sont d'abord centrées sur la mécanisation des exploitations des Hauts de la Réunion [Ac1, Ca1]³⁹. Ma formation initiale en agronomie et zootechnie et mon intérêt pour l'élevage [Rd1] m'ont incité à m'intéresser très rapidement aux exploitations d'élevage bovin en pleine émergence à cette époque où d'importantes mesures en faveur de l'aménagement des Hauts de l'île avaient été prises. L'adaptation des techniques agricoles au contexte difficile d'une agriculture de montagne a été privilégiée dans mes premiers travaux de recherche qui ont porté sur la conception d'itinéraires techniques pour l'implantation de graminées fourragères, l'entretien et la régénération des prairies [Ac2]. Mes études sur l'enracinement des graminées fourragères selon différents itinéraires de travail du sol ont apporté une contribution à la thèse de doctorat soutenue par Perret (1992)⁴⁰. Les résultats de ces expérimentations ont été consignés dans des rapports d'activités, objets des conventions entre la Région Réunion et le CIRAD et publiés dans la revue CIRAD Magazine destinée à la vulgarisation des résultats de la recherche [Ac3 à Ac17]. Des synthèses ont également été rédigées [Oc1, Rr1 à Rr3], en particulier dans l'ouvrage collectif CIRAD-INRA sur l'élevage bovin à la Réunion [O1]. L'expertise que j'ai acquise dans le domaine du travail du sol et de l'implantation des prairies a été valorisée par une formation dispensée à l'île Maurice auprès d'ingénieurs et de techniciens de la filière canne à sucre [Dp1].

Gestion des stocks fourragers et gestion des stocks d'effluents d'élevage, qui constituent les deux interfaces entre les systèmes sol-plante et les systèmes d'élevage, sont devenues par la suite mes objets de recherche principaux. La figure 1 donne une représentation de l'exploitation bovin lait [Rr19] avec la différenciation de 4 types de stocks entre lesquels s'organisent des flux essentiellement sous le contrôle de l'éleveur. D'autres flux avec l'extérieur de l'exploitation, également sous le contrôle de l'éleveur, sont aussi représentés, ainsi que les flux biophysiques non directement contrôlés par l'éleveur mais qui résultent de ses décisions de gestion et de l'interaction avec l'environnement.

Dans un premier temps, soucieux de la fourniture de biomasse fourragère aux animaux dans le temps et l'espace, je me suis intéressé au report de fourrage sous forme d'ensilage. Mes travaux de thèse de doctorat [Rd2], m'ont alors amené à étudier l'ensemble du processus d'ensilage, de la qualité nutritive des fourrages à la distribution aux animaux, en passant par la technologie d'enrubannage, la conservation de la ressource fourragère et les coûts de récolte, dans les différentes situations pédoclimatiques de la Réunion (cf. § II.2.1.1.). La diversité des thèmes couverts était liée au partenariat étroit avec les organisations de développement dans une démarche de type recherche-action [Ca2]. Puis, débordant le cadre strict de l'exploitation d'élevage, je me suis intéressé à la récolte en zone cannière et à la conservation de la paille de canne à sucre (cf. § II.2.1.2.) à destination de l'alimentation et du paillage des animaux afin d'accroître, grâce à des transferts entre régions de l'île, la disponibilité en ressources fourragères et en litières pour les élevages des Hauts [Ci6, Ci8].

Après cette approche par les techniques, j'ai initié des travaux systémiques sur la compréhension des stratégies, tactiques et pratiques des éleveurs laitiers pour alimenter leurs troupeaux. Des typologies fonctionnelles ont été produites permettant de donner des clés de lecture nouvelles aux décideurs de la filière laitière, notamment par l'orientation du conseil agricole [Tm5 à Tm7] (cf. § II.2.1.3.).

³⁹ Les références entre crochets dans le texte correspondent à une production personnelle ou à des travaux encadrés des sections « Liste des publications » et « Travaux encadrés » de la partie I.

⁴⁰ PERRET S., 1992. Etude de propriétés physiques, hydriques et mécaniques de sols andiques de La Réunion - Facteurs naturels et anthropiques d'évolution des horizons culturels, implications agronomiques et écologiques. Thèse de Doctorat en Sciences Agronomiques, ENSAM, CIRAD, Montpellier, 278 p.

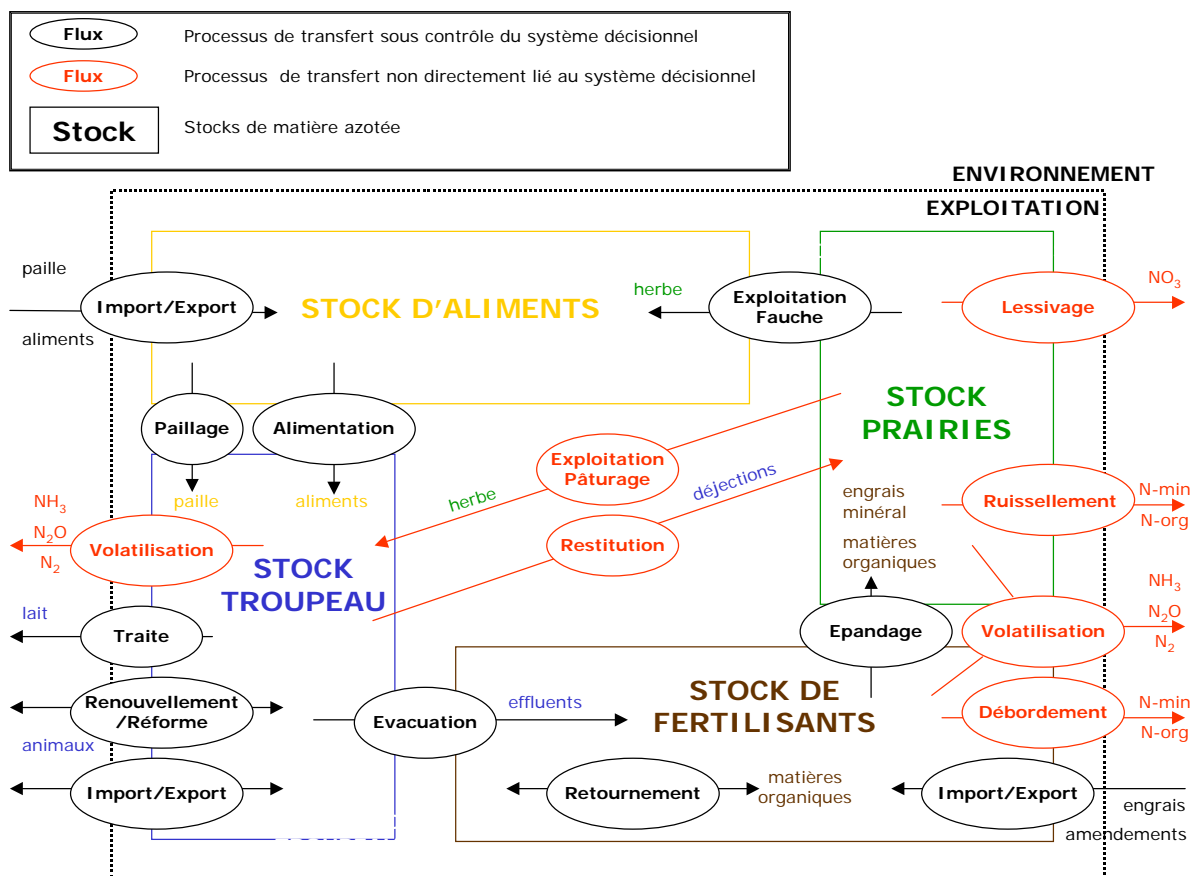


Figure 1. Représentation globale d'une exploitation d'élevage bovin laitier par un diagramme de flux de matières azotées [Rr19].

Dans un second temps, ce positionnement de recherche systémique, intégrant l'ensemble du système d'élevage, a été adopté pour la gestion des effluents, en considérant également les autres types d'élevage, notamment porcins et avicoles (cf. § II.2.2.1.). Ainsi, j'ai encadré des recherches sur les stratégies et pratiques des agriculteurs pour produire, stocker, transformer, redistribuer les matières organiques (MO) d'origine animale [Ai4, Rr11, Rr14] (cf. § II.2.2.2.). L'approche a concerné l'exploitation agricole, lieu essentiel de la prise de décision, mais également le territoire en tant qu'espace de liens (les flux de matières) entre exploitations pour mieux gérer cette ressource.

Cet élargissement dans le positionnement de mes recherches a ensuite été mis en œuvre dans l'action thématique programmée du CIRAD (ATP 99/60), que j'ai coordonnée durant près de 4 ans (1999-2002) avec François Guerrin (ingénieur d'études, puis de recherche, INRA, mis à disposition du CIRAD à la Réunion). J'ai ainsi abordé, en collaboration avec d'autres agronomes, des zootechniciens, des modélisateurs et des informaticiens, la modélisation de la gestion des effluents d'élevage au niveau individuel de l'exploitation agricole et au niveau collectif des transferts entre exploitations ou vers une unité de traitement (cf. § II.3.1.). Ces travaux ont été synthétisés dans un ouvrage édité sous forme de CD-Rom [O2].

La modélisation des pratiques et des flux ayant pour objectif l'évaluation de la performance agronomique et environnementale de différentes stratégies de gestion, j'ai conservé un positionnement analytique dans mes travaux pour rechercher des fonctions permettant de représenter les processus biophysiques de façon simple et adaptée à leur utilisation dans les modèles de gestion. J'ai privilégié deux techniques agricoles au cœur de la maîtrise des cycles de nutriments par les éleveurs (Fig 1.) : l'épandage d'effluents bruts et le compostage de ces effluents, ces deux activités pouvant conduire à des pertes importantes de nutriments et à la pollution de l'environnement. Ces techniques permettent notamment d'améliorer les transferts de MO entre producteurs et consommateurs ; cependant, le référentiel local de la Réunion et l'état des connaissances générales nécessitaient des recherches pour en quantifier le bilan environnemental, en raison des transferts potentiels vers l'atmosphère qu'elles induisent. Des travaux sur la volatilisation d'ammoniac à l'épandage en conditions tropicales et en

altitude ont ainsi été conduits dans l'ATP 99/60 [Ai14, Ca10] (cf. § II.2.2.3.). Le programme Porcherie Verte⁴¹ a par ailleurs constitué le cadre initial de mes recherches sur le compostage des effluents d'élevage (cf. § II.2.2.4.). Différents rapports, objets des conventions avec l'ADEME, ont été rédigés [Rr17, Rr18, Rr21] ainsi que des publications [Ai3, Ai6, Ai9, Ai10, Ci19, Ci20]. Les travaux sur le compostage se poursuivent actuellement par une approche de modélisation [Ai16], objet de l'encadrement d'une thèse de doctorat (cf. § I.1.4.1.), dans le cadre d'un partenariat industriel (convention CIFRE avec Crête d'Or Entreprise) et du projet ISARD [Ci36].

L'intégration de fonctions biophysiques simplifiées dans les modèles de gestion MELODIE⁴² et GAMEDE⁴³ a constitué un premier thème de recherche dans le cadre du projet SPA/DD (cf. § II.3.2.). Les fonctions auxquelles je me suis intéressé avaient pour but de représenter simplement les processus concernant les émissions gazeuses intervenant dans la manipulation des effluents d'élevage et les pertes d'aliments dépendant de la conservation du fourrage ensilé. Un second thème concernait la simulation de situations de gestion territoriale d'effluents d'élevage : zone sud-est de l'Ille et Vilaine, zone de Petit et Grand Tampon à La Réunion, avec les modèles COMET [Ci28 à Ci31] et BIOMAS [Tm19], respectivement. Le troisième thème visait l'évaluation environnementale multicritères de scénarios de gestion de lisier avec l'ACV [Ai8] et l'articulation entre cette approche statique et les modèles dynamiques simulant la gestion des systèmes d'élevage [Ac18, Ci34, Cs19] (cf. § II.3.3.).

Ce mémoire des travaux de recherche est constitué de deux parties. La première traite de la gestion des stocks considérée à travers l'acquisition de connaissances aussi bien sur les systèmes biophysiques que sur les pratiques des agriculteurs (Fig. 2). Au sein du système d'élevage, cette gestion est étudiée pour les stocks fourragers (cf. § II.2.1.) et les effluents d'élevage (cf. § II.2.2.) (Fig. 1). La seconde partie s'intéresse à la modélisation, de la gestion des effluents dans un premier temps (cf. § II.3.1.), puis des systèmes d'élevage intégrant des variables biophysiques et des variables de décision (cf. § II.3.2.), ces recherches ayant pour objectifs l'évaluation environnementale de stratégies de gestion (cf. § II.3.3.) et l'utilisation des modèles en aide à la décision. Cette modélisation considère le niveau d'organisation de l'exploitation agricole et celui du territoire, vu comme un espace de liens entre exploitations pour la gestion d'une ressource (matières organiques ou fourrages).

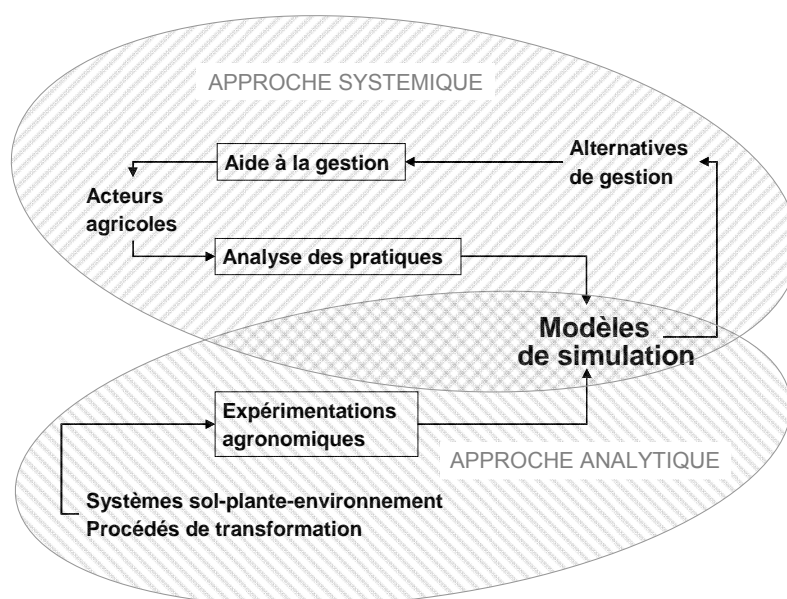


Figure 2. Complémentarité des approches analytique et systémique pour élaborer des modèles de gestion de flux de MO, construits à partir de données et de connaissances issues de l'analyse des pratiques agricoles et de références sur les systèmes biophysiques, dans le but de proposer de nouvelles stratégies de gestion aux acteurs agricoles (d'après [Ca11]).

⁴¹ Action 42c : Effet du compostage d'effluents porcins sur les émissions gazeuses et les teneurs en éléments polluants.

⁴² Modélisation de l'exploitation d'élevage en langage objet pour le diagnostic des impacts environnementaux ; ce modèle développé par Xavier Chardon [Tt4, Ai15] au sein de l'UMR PL et de l'IE et Cyrille Rigolot [Tt5, Ai12] au sein de l'UMR SENA et de l'IFIP, représente l'exploitation laitière et/ou porcine de grand ouest français.

⁴³ Global activity model for evaluating the sustainability of dairy enterprises ; ce modèle développé par Jonathan Vayssières au sein de l'UPR Système d'élevage du CIRAD représente l'exploitation bovin lait de la Réunion [Tt3, Ai11].

Pour chacune des thématiques étudiées, j'aborderai successivement l'objet et les finalités de la recherche en les repositionnant dans leur contexte, l'intérêt scientifique, la méthodologie utilisée et je décrirai les principaux résultats illustrés si besoin par quelques figures et tableaux (les publications sélectionnées en annexe complètent cette synthèse) ; enfin, je porterai un regard critique permettant d'articuler les différents travaux entre eux et ébauchant quelques perspectives.

II.2. La gestion des stocks : interface entre agriculture et élevage

II.2.1. Gestion des systèmes fourragers et conservation de la biomasse

II.2.1.1. Conservation des fourrages tempérés et tropicaux en balles enrubannées

Objet et finalités de recherche

L'élevage bovin laitier de La Réunion, constituant essentiel de l'aménagement des Hauts de l'île, nécessitait des reports de fourrage pour combler le déficit fourrager de la saison sèche et fraîche et permettre ainsi l'essor de la filière laitière amorcée à la fin des années 80. J'ai donc étudié les facteurs impliqués dans la confection et la conservation des ensilages d'herbe réalisés avec la technique de l'enrubannage⁴⁴, dans les conditions pédoclimatiques très diversifiées des Hauts de l'île. Cette technique d'introduction récente à l'époque en Europe (1987) et en France permettait d'envisager des chantiers de taille modeste (stockage en balles individuelles), faciles à mettre en œuvre et compatibles avec la topographie de cette zone de montagne et la structure des exploitations de petite taille pour la plupart. Ces recherches, couvrant différents aspects de la maîtrise de cette technique depuis la caractérisation de l'aptitude des fourrages à l'ensilage jusqu'aux coûts des chantiers de récolte, ont fait l'objet de ma thèse de doctorat soutenue en 1995 [Rd2].

Intérêt scientifique

L'intérêt scientifique de ce travail peut être résumé en quatre points principaux :

- acquisition de connaissances sur les fourrages tempérés (dactyle, ray-grass, fétuque, brome) et tropicaux (kikuyu) et sur leurs conditions de récolte à la Réunion – caractérisation de l'aptitude à l'ensilage de ces fourrages,
- compréhension des processus de fermentation des ensilages en balles enrubannées et identification des principaux facteurs de contrôle – mise au point d'une méthode de qualification des ensilages,
- mise au point d'une méthodologie de tests de films plastiques étirables et élaboration de critères d'appréciation de la qualité des films – acquisition d'un référentiel sur la résistance des films sous climat tropical et d'altitude,
- compréhension des facteurs affectant la performance des chantiers de récolte – élaboration d'une grille d'analyse des coûts de récolte et comparaison des coûts entre différentes techniques.

Méthodologie

La démarche méthodologique que j'ai développée est décrite par la figure 3. Différentes méthodes ont été utilisées ou mises au point selon le thème de recherche traité :

- caractérisation des fourrages (valeurs nutritives, composition biochimique, selon Demarquilly *et al.*, 1980)⁴⁵ et aptitude à l'ensilage (teneurs en glucides solubles, pouvoir tampon),
- caractérisation climatique des régions (pluie, températures, ensoleillement, déficit de saturation de l'air) et conditions de dessiccation des fourrages (suivis au champ en faisant varier l'espèce, le rendement fourrager, les réglages des machines) (Demarquilly, 1987)⁴⁶,

⁴⁴ Cette technique consiste à enrouler les balles de fourrage préfané et pressé avec un film étirable, pour assurer l'étanchéité à l'air et conserver ainsi le fourrage ; c'est une forme d'ensilage d'herbe.

⁴⁵ DEMARQUILLY C., ANDRIEU J.-P., SAUVANT D., DULPHY J.-P., 1980. Composition et valeur nutritive des aliments. In : Alimentation des ruminants, R. Jarrige Ed., Institut National de la Recherche Agronomique, Versailles, pp 469-518.

⁴⁶ DEMARQUILLY C., 1987. La fenaison : évolution de la plante au champ entre la fauche et la récolte, perte d'eau, métabolisme, modifications de la composition morphologique et chimique. In : Les fourrages secs : récolte, traitement, utilisation, C. Demarquilly Ed., INRA, Paris, pp 23-46.

- étanchéité de l'enrubannage (Gaillard et Berner, 1989)⁴⁷ : tests sous pression d'air sur balle témoin faisant varier le type de film, sa largeur, le nombre de couches – modélisation des échanges gazeux entre la balle enrubannée et l'extérieur,
- résistance des films en conditions d'exposition tropicale (exposition sur cadres et sur balles témoin),
- qualité de conservation des ensilages et processus fermentaires : analyses fermentaires, étude des facteurs de conservation (McDonald *et al.*, 1991)⁴⁸ (teneur en MS, ajout de sucres et de conservateurs chimique et biologique), analyses statistiques multivariées des conditions de conservation,
- temps de travaux et coût de revient dans les différentes régions d'élevage de l'île (critères de calcul : charges fixes et variables, analyses statistiques multivariées des conditions de récolte).

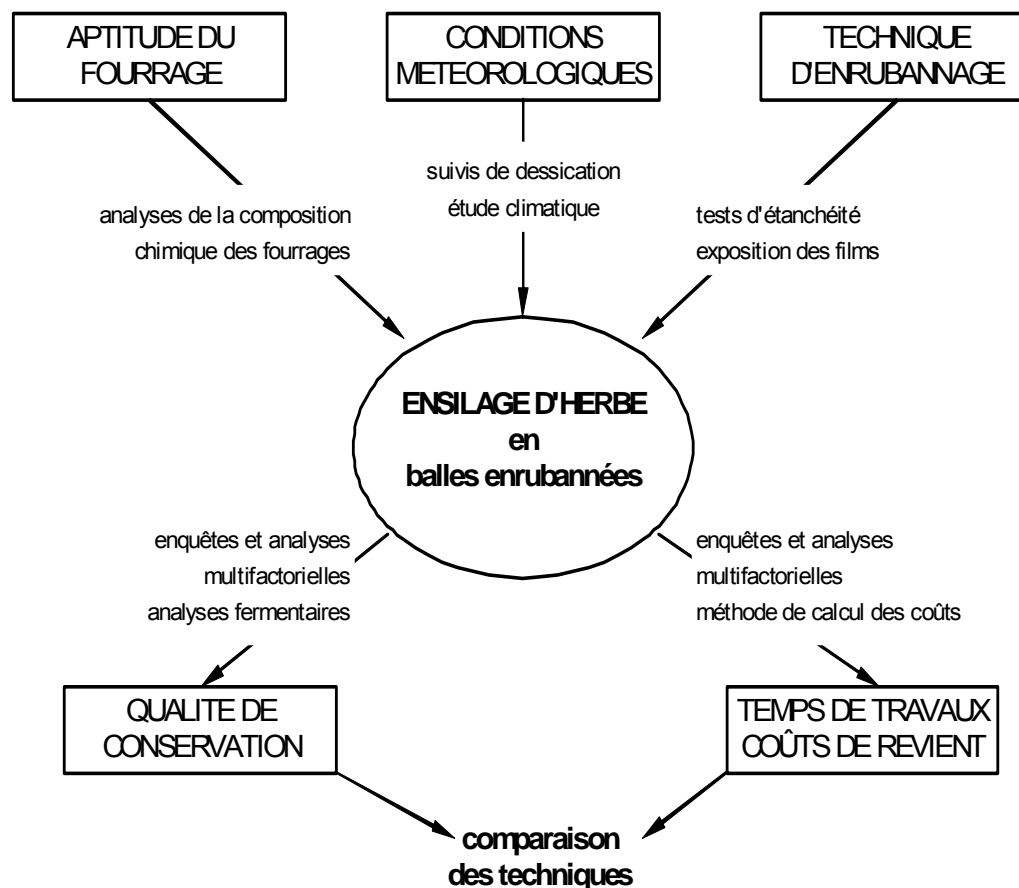


Figure 3. Présentation de la démarche de recherche, des thèmes de recherche et des méthodes mises en œuvre concernant l'étude de la conservation des fourrages en balles enrubannées [Rd2, Oc7].

Principaux résultats

Un apport de mélasse de canne à sucre, facilement disponible sur l'île, est nécessaire pour ensiler correctement les fourrages réunionnais tempérés et tropicaux car leur teneur en glucides solubles est le plus souvent trop faible, comparativement aux mêmes fourrages récoltés en France métropolitaine. Cet apport peut cependant être modulé en quantité selon le fourrage : kikuyu (*Pennisetum clandestinum*) > dactyle (*Dactylis glomerata*) > ray grass (*Lolium perenne* et *Lolium multiflorum*), et la saison : été chaud et humide > hiver frais et sec. Les conditions climatiques locales sont déterminantes pour la

⁴⁷ GAILLARD F., BERNER J.-L., 1989. Le banderolage des balles d'ensilage - Etude de l'étanchéité des films. In : Bulletin Technique du Machinisme et des Equipements Agricoles, CEMAGREF, Antony, n°36, pp 35-43.

⁴⁸ MCDONALD P., HENDERSON A.R., HERON S.J.E., 1991. The biochemistry of silage. Second edition, Chalcombe Publications, Marlow, 340 p.

dessiccation du fourrage nécessaire au préfanage recommandé pour cette technique. Les régions où la durée d'ensoleillement, la température et le vent sont plus élevés, offrent les meilleures conditions malgré une pluviosité supérieure ; les Hauts de l'Ouest, région la plus sèche offre les plus mauvaises conditions de dessiccation, à l'opposé de la Plaine des Palmistes où la pluviométrie est abondante (4000 mm/an). La dessiccation du fourrage dépend également de l'espèce, notamment en lien avec la fermeture plus ou moins rapide des stomates présents à la surface des feuilles qui succède à la fauche (Demarquilly, 1987, *op. cit.*), par ordre de rapidité de séchage : fétuque > dactyle > ray-grass > kikuyu ; elle est inversement proportionnelle au rendement fourrager et s'améliore avec la hauteur de coupe qui autorise une meilleure circulation de l'air sous les andains.

L'étanchéité de différents films étirables et leur résistance ont été testées en conditions tropicales et d'altitude marquées par un fort rayonnement, notamment de type UV. Des améliorations de la méthode de certification des films étirables, basée sur la mesure d'étanchéité et les tests d'exposition, ont été proposées [Ai1, Ci3].

La teneur en MS est le principal facteur de conservation appréhendé grâce à la mise au point d'une note synthétique caractérisant la qualité de conservation de l'ensilage. Des seuils ont été établis : teneur minimale de 27 % pour les graminées tempérées et de 40 % pour le kikuyu (*Pennisetum clandestinum*). D'autres facteurs tels que le type de fourrage : espèces tempérées > espèces tropicales, les conditions météorologiques et l'aptitude à la mécanisation sont également des variables discriminantes. Les apports de sucres (mélasse) et de ferments biologiques (bactéries lactiques sélectionnées) améliorent les caractéristiques de fermentation, seulement si la teneur en MS est suffisante. En effet, comme le montre la figure 4, avec l'ajout de mélasse au fourrage, l'apport de glucides solubles permet une acidification du fourrage par les bactéries lactiques plus prononcée (pH plus bas) et plus rapide (atteinte du pH de stabilité plus précoce), empêchant ainsi le développement de la flore butyrique responsable de la dégradation des glucides puis des protéines (Gouet *et al.*, 1979)⁴⁹. L'emploi de conservateur biologique améliore la conservation, mais cette amélioration n'est vraiment notable que pour des fourrages présentant une teneur en MS suffisamment élevée (> 30 %) et en présence d'une quantité importante de glucides solubles (100 à 120 g kg⁻¹ MS) ([Ci5] ; Demarquilly, 1986, 1993)⁵⁰.

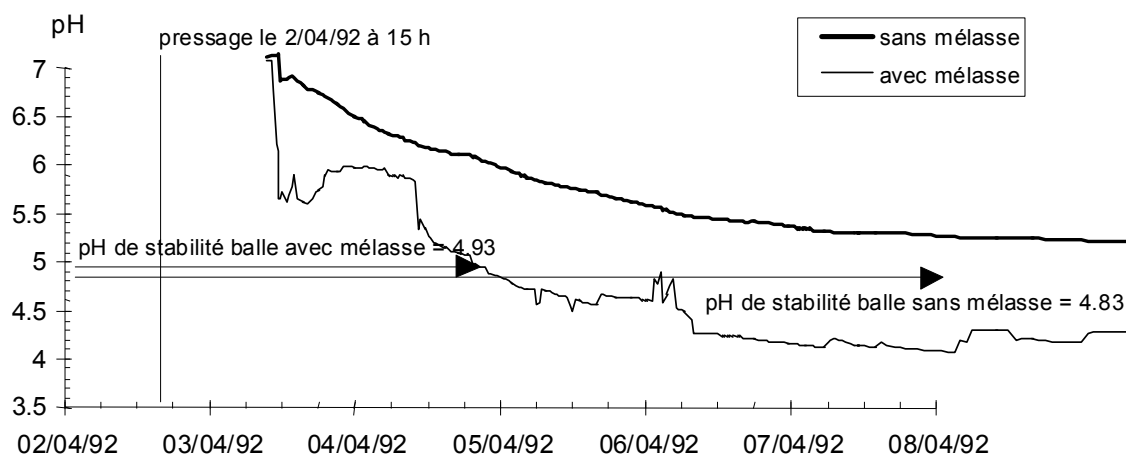


Figure 4. Influence de l'apport de mélasse sur l'acidification d'un ensilage d'un mélange de dactyle-Ray-Grass-Hybride - kikuyu, récolté au stade feuillu avec une teneur en MS de 40 % [Rd2].

⁴⁹ GOUET P., GIRARDEAU J.-P., RIOU Y., 1979. La flore microbienne des ensilages - II. Intérêt de l'inoculation de bactéries lactiques dans les ensilages de fourrages verts, influence du nombre, du conditionnement et de l'addition de glucides. In : Bulletin Technique, C.R.Z.V., Institut National de la Recherche Agronomique, Theix, (37), pp 25-30.

⁵⁰ DEMARQUILLY C., 1986. L'ensilage et l'évolution récente des conservateurs. In : Bulletin Technique C.R.Z.V. Theix, Institut National de la Recherche Agronomique, Ceyrat, (63), pp 5-12.

DEMARQUILLY C., 1993. Qualité de conservation de l'ensilage en balles : quelles perspectives liées à l'emploi de conservateurs, au tronçonnage ? Que peut-on escompter des nouvelles techniques qui apparaissent ? In : Commission ensilage, journée technique de Varennes s/Allier le 17 juin 1993, Comité des Plastiques en Agriculture, Paris, pp 46-50.

La comparaison avec les autres techniques d'ensilage utilisées à la Réunion (conservation en silo après ressuyage du fourrage et coupe fine ou système double coupe) a montré la meilleure qualité des ensilages en balles enrubannées, liée principalement à une teneur en MS généralement plus élevée et à une étanchéité meilleure que celle des silos.

Pour compléter l'étude de cette technique de conservation du fourrage, les coûts de récolte ont été analysés montrant de grandes différences entre les régions d'élevage, principalement en raison des conditions de mécanisation (taille et configuration des parcelles), du type de fourrage (par ordre de coût : tempérées < tropicales), du stade (par ordre de coût : précoce < tardif), de la teneur en MS à la récolte et du type d'organisation possible localement (par ordre de coût : entraide < entreprise) [Ci2]. La comparaison des coûts des différentes techniques de récolte en ensilage montre peu de différences lorsque ces techniques sont évaluées dans un contexte semblable.

Regard critique

L'originalité de ces travaux de thèse portant sur une technique de conservation du fourrage en ensilage réside dans la grande diversité des questions scientifiques traitées. En cela, ils reflètent bien les modalités de recherche en partenariat avec des organismes de développement que l'on pourrait qualifier de recherche-action (Albaladejo et Casabianca, 1997)⁵¹. Ce type de recherche a été développé au CIRAD à la Réunion au cours des années 1990 et a fait l'objet d'une action thématique programmée, coordonnée par Sylvain Perret (1995)⁵² concernant les systèmes de culture diversifiés des Hauts de l'Ouest de l'île. J'ai participé à cette démarche à travers de nombreuses expérimentations en exploitations d'élevage impliquant directement la participation des éleveurs et de leurs organisations professionnelles [Ca2]. Pour ce type de recherche, la diffusion des résultats de recherche est souvent immédiate. Dans le cas de l'ensilage en balles enrubannées, ma recherche a été menée de concert avec le développement de la technique qui est devenue la principale, voire actuellement l'unique méthode de conservation du fourrage et de report fourrager de la saison chaude vers la saison fraîche dans les exploitations bovines réunionnaises [Oc7].

On retiendra également que les résultats de ces travaux analytiques ont été mobilisés dans la thèse de Jonathan Vayssières [Tt3], dont j'ai participé à l'encadrement, pour construire et paramétrer le module de conditionnement du fourrage dans le modèle GAMEDE qui simule la gestion technique d'exploitations laitières réunionnaises. Les intensités de dessiccation des fourrages ont été reliées à l'évapotranspiration potentielle et à la pluviométrie, données météorologiques facilement accessibles et au rendement fourrager simulé par le module de croissance du fourrage. La qualité de conservation est déterminée par un abaque (4 classes), dont j'ai participé à l'élaboration, croisant la teneur en MS du fourrage récolté, prédite à partir des intensités de dessiccation, et l'apport de conservateur, notamment la mélasse. La valeur alimentaire de l'ensilage et les pertes de fourrage sont alors calculées en fonction de cette qualité de conservation en utilisant les équations d'Andrieu et Demarquilly (1987)⁵³.

II.2.1.2. Récolte et traitement de la paille de canne à sucre

Objet et finalités de recherche

L'amélioration de la productivité des prairies et le report fourrager de l'herbe produite en excédent durant la saison chaude a permis un gain important de la production laitière réunionnaise au début des années 90. La production laitière a plus que doublé entre 1989 et 1996 : de 6,2 à 12,7 ML (FRCA, 2010)⁵⁴ ; ce doublement coïncide avec la mise en œuvre à partir de 1990 de l'ensilage en balles enrubannées. Cependant, ce gain a été assez rapidement plafonné par le manque de foncier disponible. S'intéresser à la complémentarité des systèmes de production par la mobilisation des sous-

⁵¹ ALBALADEJO C., CASABIANCA F. (editors), 1997. La recherche-action: ambitions, pratiques, débats. Document Etudes et Recherches sur les Systemes Agraires et le Developpement, num. 30. INRA, Versailles, France

⁵² PERRET S., 1995. Des outils pour raisonner et conduire des actions de recherche. Cas de la gestion des ressources naturelles dans les Hauts de l'Ouest (Réunion). In : Méthodes Participatives de Recherche et de Développement dans l'Océan Indien. Saint-Denis : CIRAD-SAR, 7 p.. Méthodes participatives de recherche et de développement dans l'océan indien, 1995-11-06/1995-11-10, (Saint-Leu, Réunion).

⁵³ ANDRIEU J.-P., DEMARQUILLY C., 1987. Valeur nutritive des fourrages : tables et prévisions. In : Bulletin Technique C.R.Z.V. Theix, Institut National de la Recherche Agronomique, Ceyrat, (70), pp 61-73.

⁵⁴ http://www.frca-reunion.coop/BanquedImage/pdf_33_6.pdf

produits de la canne à sucre est devenu primordial pour poursuivre le développement de la filière lait. Cette complémentarité était d'ailleurs déjà mise en œuvre par certains éleveurs qui récoltaient traditionnellement les choux de canne (sommités) lorsque leurs élevages se situaient à proximité des champs de canne à sucre donc, essentiellement en zone de piémont. La récolte des pailles dans les grandes exploitations cannières après la récolte mécanisée de la canne à sucre a donc été envisagée par la filière laitière à une échelle assez large : transport depuis le nord de l'île, où la récolte de canne à sucre est le plus souvent mécanisée, jusqu'aux zones d'élevage des plaines d'altitude et du sud. Pour fiabiliser cette récolte et garantir la conservation des pailles de canne à des fins d'alimentation du troupeau laitier, il était apparu nécessaire d'étudier les modalités de récolte et de tester l'apport d'urée agissant à la fois comme conservateur, mais également comme améliorateur de la valeur nutritive de ce fourrage présentant une faible digestibilité (Hassoun, 1987)⁵⁵.

Intérêt scientifique

Trois intérêts scientifiques principaux à ces travaux seront retenus :

- étude de la dessiccation de la paille au champ et de la performance des chantiers de récolte pour évaluer la faisabilité économique du transfert de ces sous-produits de la canne vers l'élevage,
- amélioration de la qualité nutritive des sous-produits récoltés pour les bovins et de leur conservation en balles cylindriques,
- utilisation des sous-produits bruts ou traités pour alimenter les bovins ; ce dernier point a été étudié par P. Hassoun (2002)⁵⁶.

Méthodologie

Pour l'étude de la dessiccation du fourrage, nous avons repris la méthodologie utilisée pour le fourrage avec pesée régulière d'une fraction du mulch ou des andains sur cadres métalliques [Rd2] en distinguant le ramassage de la paille après brûlage ou sans brûlage des cannes préalablement à leur récolte.

Le principe de traitement (Chenost et Gaillard, 1996)⁵⁷ réside dans l'hydrolyse de l'urée en ammoniac sous l'action de l'uréase fabriquée par les bactéries présentes dans le sol et sur la paille. Sous bâche étanche, l'ammoniac ainsi dégagé se fixe sur la paille et la rend plus digestible par la modification des liaisons hémicellulose – lignine qu'il provoque (Hassoun, 1987, *op. cit.*). Le traitement à l'urée a été effectué de deux manières différentes et pour trois doses : sur la presse avec un apport d'urée représentant 4,4% de la MS paille, en meule avec un apport de 6% de la MS paille (70 L d'eau par balle) ou de 8,5% de la MS paille (100 L d'eau par balle). L'homogénéité du traitement a été appréciée par prélèvement en différents points des balles et mesure de la dégradabilité enzymatique selon Aufrère et Michalet-Doreau (1988)⁵⁸.

Principaux résultats

Concernant la dessiccation de la paille, le critère le plus pertinent est l'intensité moyenne de dessiccation. L'évolution de la teneur en MS est très bien corrélée à la somme des déficits de saturation de l'air (Casagrande, 1991)⁵⁹ durant la période de séchage. La fonction logarithmique retenue est identique pour la paille de canne récoltée après brûlage ou sans brûlage. A partir de ces différents paramètres, il est possible de modéliser la dessiccation et ainsi de simuler en fonction des

⁵⁵ HASSOUN P., 1987. Amélioration de la valeur nutritive de la bagasse de canne à sucre par un traitement à l'ammoniac (généré par hydrolyse de l'urée) et son utilisation par les ruminants. Rôle des micro-organismes sur l'uréolyse. Thèse de doctorat Université des Sciences et Techniques du Languedoc, Montpellier, 225 p.

⁵⁶ HASSOUN P., FULCHER C., NABENEZA S., 2002. Feeding dairy heifers untreated or urea-treated fibrous sugarcane residues: effect on dry matter intake, growth, and metabolic parameters. *Animal Feed Science and Technology*, 100 (2002) 31–41.

⁵⁷ CHENOST M., GAILLARD F., 1996. Rapport de mission à l'île de La Réunion du 26 juin au 5 juillet. SNRH-INRA Theix et CEMAGREF Montoldre, Centre de coopération Internationale de Recherche Agronomique pour le Développement, St Denis de La Réunion, 23 p.

⁵⁸ AUFRERE J., MICHALET-DOREAU B., 1988. Comparison of methods for predicting digestibility of feeds. *Animal Feed Science and Technology*, 20, 203-218.

⁵⁹ CASAGRANDE J.-R., 1991. La modélisation de la récolte des fourrages : cas du foin en grosses balles cylindriques. Thèse de doctorat de l'Institut National Agronomique Paris-Grignon, Centre National du Machinisme Agricole du Génie Rural des Eaux et des Forêts, Montoldre, 163 p + annexes.

saisons, des rendements en canne et des conditions climatiques locales, le temps de séchage. Un andainage plus précoce (teneur en MS ayant atteint 65 %) permettrait d'accélérer le séchage.

L'andainage et le pressage de la paille effectuent un tri des tiges par rapport aux feuilles et choux. En canne non brûlée, les tiges humides sont plus facilement pressées [Ci6, Ci8], ce qui favorise le développement des moisissures. En contrepartie, peu de choux sont présents dans la paille. L'hétérogénéité de la teneur en MS à l'intérieur des balles est importante. Il convient donc de pousser la dessiccation suffisamment loin (85 % de MS) afin que toutes les parties de la balle soient suffisamment sèches (> 80 % de MS). Il n'y a pas de différence significative entre le poids et la teneur en MS des balles récoltées après brûlage et sans brûlage.

Concernant les performances des machines, la densité des balles varie significativement avec le réglage de compression de la presse et la mise en place du hacheur. Les performances optimales de pressage sont obtenues avec une vitesse d'avancement moyenne (2,5 km h⁻¹) et des andains moyens constitués par le regroupement sur 3 m de largeur de la moitié de la paille (pour un rendement de l'ordre de 90 t de tiges usinables).

Le traitement à l'ammoniac par épandage d'urée sur la presse est contraignant du point de vue de l'organisation des chantiers. Le contrôle de la dose de solution par balle est délicat. La quantité d'urée par balle est donc assez variable, par contre, sa répartition dans la balle est très bonne. L'épandage manuel sur les balles disposées en meule est plus aisé, mais la quantité d'eau nécessaire est plus importante et la répartition de la solution d'urée est moins bonne, d'où un traitement hétérogène à l'intérieur des balles. Avec les deux méthodes, la décomposition de l'urée en ammoniac est efficace (95%). L'action sur la conservation de la paille est bonne. L'amélioration de la digestibilité de la paille est également notable (tableau 1) : + 16, 12 et 26% aux doses d'ammoniac libéré par rapport à la MS suivantes, respectivement : 2% (épandage sur presse), 2,9% (épandage sur balle avec 70 L d'eau) et 4% (épandage sur balle avec 100 L d'eau).

Tableau 1. Teneurs en matière sèche et en azote et dégradabilité enzymatique avant et après traitement pour la paille traitée dans la balle avec 4,4% urée kg⁻¹ MS (B5), sur la meule avec 6% urée kg⁻¹ MS (S6) et 8% urée kg⁻¹ MS (S8) [Ci8].

| | MS (%) | | N (g kg ⁻¹ MS) | | DMO (%) | | Test F |
|----|--------|-------|---------------------------|-------|---------|-------|--------|
| | avant | après | avant | après | avant | après | |
| B5 | 88 | 63 | 4.5 | 15.2 | 28.5 | 33.6 | * |
| S6 | 85 | 65 | 5.2 | 17.6 | 33.8 | 38.1 | *** |
| S8 | 84 | 69 | 5.2 | 16.6 | 27.4 | 34.7 | * |

MS = matière sèche ; N = azote total Kjeldahl ; DMO = digestibilité *in vitro* de la matière organique (Aufrère et Michalet-Doreau, 1988, *op. cit.*) ; test F = test de Fisher * : p<0.05 ; ** : p<0.01 ; *** : p<0.001

Regard critique

Le traitement à l'urée, malgré une amélioration notable de la digestibilité de la paille et de la valeur azotée du fourrage distribué, est apparu peu intéressant économiquement et techniquement assez difficile à vulgariser dans les exploitations laitières. Le transfert de paille brute, non traitée, de la zone cannière vers les Hauts a néanmoins pris un essor considérable à la fin des années 90. Ce transfert a permis une augmentation importante de la production laitière de 12,7 en 1996 à 21,8 ML en 2001 (FRCA, 2010, *op. cit.*), grâce également à la fourniture conjointe d'aliments concentrés importés. La paille est ainsi devenue une ressource supplémentaire en fourrage grossier dans les exploitations d'élevage. L'organisation par la SICA Lait, organisme chargé de la collecte laitière, de ce transfert a aussi permis d'envisager le paillage des animaux, technique encore assez peu développée en raison de la relative rareté de la ressource en paille et de bâtiments peu adaptés, mais qui permet une gestion alternative des déjections animales, comme nous le verrons ultérieurement.

Comme pour les fourrages ensilés, les résultats de ces travaux sur la récolte de la paille de canne ont été intégrés dans le modèle GAMEDE (Vayssières, 2008, *op. cit.*). Les transferts de paille entre régions peuvent également être intégrés à la modélisation de la gestion des effluents à l'échelle territoriale ; le modèle BIOMAS permet cette intégration même si aucune application n'ait encore été simulée à ce jour concernant ce transfert de ressource.

II.2.1.3. Typologie des systèmes fourragers et analyse des pratiques d'affouragement

Objet et finalités de recherche

Les systèmes d'alimentation à base de fourrages des Hauts de la Réunion sont très diversifiés sur le plan des ressources alimentaires qu'ils mobilisent, en raison de conditions pédoclimatiques très contrastées. De plus, les reports et transferts de fourrage que j'ai précédemment étudiés élargissent le champ des possibles pour produire du lait dans les Hauts, malgré l'exiguïté des structures de production dans certaines régions de l'île. Des typologies structurelles de l'élevage avaient déjà été produites (Salon, 1992)⁶⁰ permettant de distinguer les grandes catégories d'élevage bovin, allaitant, laitier, engraissement, et les conditions d'exploitations, grandes exploitations des plaines, exploitations en zone de piémont ou en zone cannière [Oc6]. L'intérêt des travaux que j'ai initiés était de se focaliser sur le fonctionnement des exploitations plus que sur leur structure, en privilégiant les élevages laitiers, dont la gestion de ressources fourragères s'avère plus complexe. En adoptant une approche systémique considérant l'ensemble du système fourrager, j'ai encadré plusieurs études [Tm5, Tm6] pour (i) cerner les différents modes de gestion des stocks alimentaires pratiqués par les éleveurs laitiers, et (ii) fournir un cadre de représentation des pratiques des éleveurs pour mettre au point des outils d'aide à la gestion de l'affouragement.

Intérêt scientifique

Les intérêts scientifiques principaux peuvent être résumés ainsi :

- formalisation des connaissances sur la diversité des systèmes d'affouragement des animaux laitiers,
- représentations conceptuelles des objectifs, stratégies et pratiques des éleveurs pour alimenter leurs animaux.

Méthodologie

Avec les étudiants que j'ai encadrés sur ce sujet, nous avons mis en œuvre plusieurs méthodologies :

- réalisation d'une typologie basée, tout d'abord, sur une analyse globale de l'exploitation (atouts, contraintes) puis, de façon plus spécifique, sur les stratégies d'élevage (Capillon *et al.*, 1988)⁶¹,
- explicitation des fonctions attribuées par les éleveurs aux différentes composantes de leur système fourrager (Dubeuf *et al.*, 1995 ; Fleury *et al.*, 1995)⁶²,
- représentation de la qualité des aliments et analyse des règles de gestion de ces aliments (Girard *et al.*, 1994)⁶³.

Pour formaliser le raisonnement caractérisant la stratégie de l'éleveur, nous avons aussi utilisé les travaux de Hubert *et al.* (1993) et Girard et Lasseur (1997)⁶⁴.

Principaux résultats

La typologie des élevages laitiers a mis en évidence trois groupes principaux [Tm5]. Le groupe A regroupe des petites exploitations à l'avenir incertain et représentait, en 1996, 40% des exploitations laitières. Il s'agit :

⁶⁰ SALON S., 1992 - Typologie des élevages bovins, île de la Réunion 1991/1992. CIRAD EMVT Réunion, St Pierre, 16 p.

⁶¹ CAPILLON A., LEGENDRE J., SIMIER J. P., VEDEL G., 1988. Typologie et suivis technico-économiques d'exploitations : quels apports pour l'amélioration des systèmes fourragers ? Journées de l'AFPF, Paris, 33-55.

⁶² DUBEUF B., FLEURY P., JEANNIN B., 1995. Diversité des fonctionnements fourragers et conséquences pour le conseil. Fourrages, 141, Paris, 19-32.

FLEURY P., DUBEUF B., JEANNIN B., 1995. Un concept pour le conseil en exploitation laitière : le fonctionnement fourrager. Fourrages, 141, Paris, 3-18.

⁶³ GIRARD N., HAVET A., CHATELIN M. H., GIBON A., HUBERT B., RELIER J. P., 1994. Formalisation des relations entre stratégie et pilotage dans les systèmes fourragers. Proposition pour la conception d'instruments d'aide à la décision. Recherches-système en agriculture et développement rural, Inra, Paris, 223-229.

⁶⁴ HUBERT B., GIRARD N., LASSEUR J., BELLON S., 1993. Les systèmes d'élevage ovin préalpins : derrière les pratiques, des conceptions modélisables. Etudes et recherches sur les systèmes agraires et le développement, Inra, 27, Paris, 351-385.

GIRARD N., LASSEUR J., 1997. Stratégies d'élevage et maîtrise de la répartition temporelle de la production - Exemple des élevages ovins allaitant en montagne méditerranéenne. Cahiers de l'agriculture, 6, Paris, 115-124.

- d'exploitation en fin d'activité (A11) ou de petits élevages avec volonté de reprise par un jeune (A12),
- de petits élevages avec un problème de maîtrise technique (A2),
- de jeunes avec une installation précaire, très incertaine, souvent en raison du manque de foncier (A3).

Le groupe B concerne des mises en place d'élevage avec une spécialisation laitière en cours (B).

Ces exploitations des groupes A et B requéraient une attention particulière de la part de la filière lait en terme de choix de système d'élevage et de conseil technique, en particulier les types A12 et B, qui représentaient, en 1996, 10% et 18% des exploitations, respectivement.

Le groupe C (42% des exploitations enquêtées) regroupe des exploitations moyennes à grandes avec des stratégies fourragères très variées :

- autonomie fourragère soit en limitant les intrants (C11) pour les grandes exploitations, soit en intensifiant la production par l'apport de concentrés (C12) pour les exploitations moyennes ;
- des stratégies de pâturage et de limitation des stocks fourragers (C2) ;
- des stratégies d'augmentation de la production dans un contexte d'inadéquation entre la taille du troupeau et le disponible fourrager (C3) ; cette augmentation est permise par l'aménagement de prairies lorsque le foncier est disponible (C31) ou par l'innovation fourragère en allant chercher des ressources fourragères à l'extérieur de l'exploitation (foin, bagasse, maïs, paille de canne, ensilage en balles enrubannées) (C32).

L'analyse des pratiques montre que ces différents systèmes d'élevage présentent des associations de plusieurs fonctions fourragères leur permettant d'alimenter le troupeau. Les stratégies d'alimentation reposent sur la couverture des besoins par les concentrés, la valorisation de l'herbe ou l'achat extérieur (paille de canne, bagasse) et la constitution de stocks. On peut ainsi distinguer [Tm6] :

1- les fonctions d'achat à l'extérieur de l'exploitation :

- du foin (ou de la bagasse ou de la paille de canne) pour la teneur en matière sèche de la ration sur toute l'année ou au moins en période humide,
- de l'achat pour l'hiver,
- du stock de soudure,
- de l'achat pour l'année,

2- les fonctions parcellaires liées à la production herbagère déclinées en :

fonctions de stock :

- de l'ensilage en grande quantité pour toute l'année quelle que soit la qualité,
- du stock sur pied en quantité pour l'hiver,

fonctions mixtes :

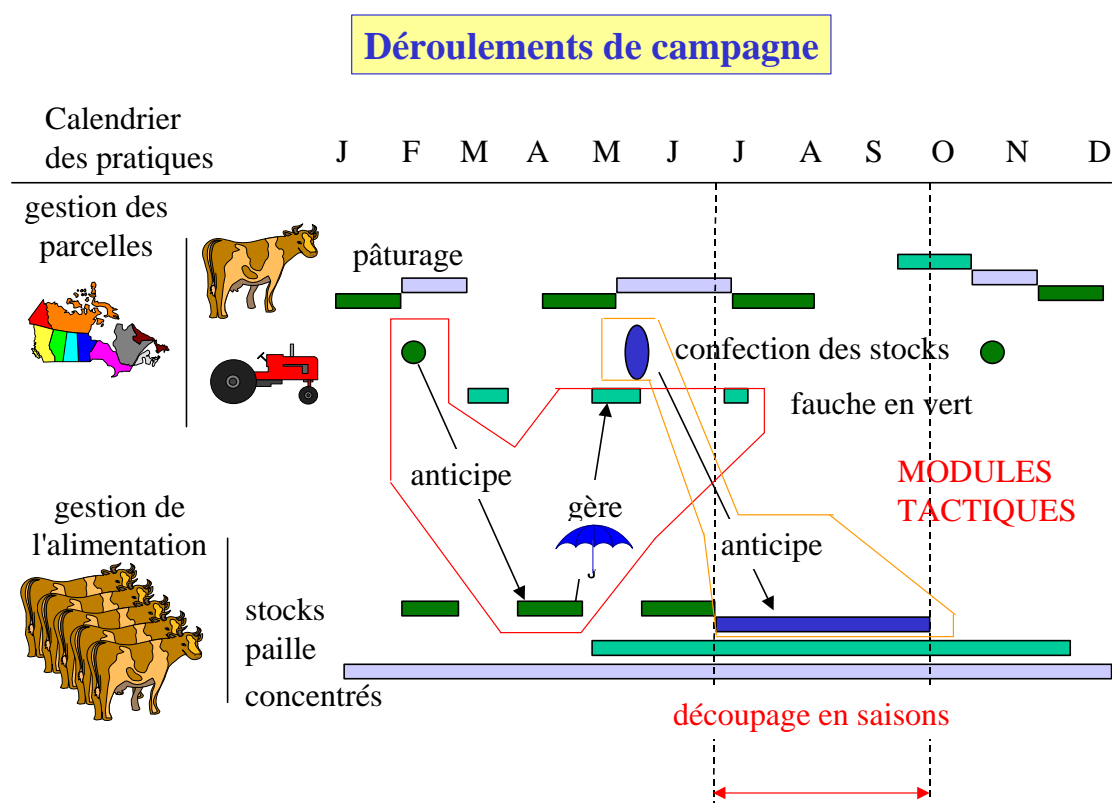
- réaliser un ensilage de qualité et en quantité pour toute l'année et alimenter les animaux par de la fauche en vert en été essentiellement,
- du bon ensilage en hiver et de la pâture ou fauche en vert le reste de l'année,
- de l'ensilage en quantité pour l'hiver et de la pâture en hiver,

fonctions de pâturage ou de fauche en vert :

- à manger sans entretien de la prairie,
- de l'herbe pour l'hiver,
- une production régulière d'une certaine qualité sur toute l'année,
- de la fauche en vert pour le lait,
- de la production d'été et l'hiver s'il y en a.

Les stratégies d'allotement sont très variables, de 1 à 10 lots d'animaux [Tm6]. La formalisation du raisonnement de l'éleveur pour gérer son système fourrager comprend la représentation de l'utilisation du territoire, une description des pratiques et la mise en évidence de saisons-pratiques dépendant beaucoup des régions d'élevage [Oc6]. Trois modes d'organisation du territoire de l'exploitation laitière ont été identifiés : concentrique ou excentré avec, respectivement, les bâtiments situés au milieu ou en bordure des parcelles de pâturage, ou divisé en quartiers répartissant les bâtiments et les lots d'animaux sur différents îlots de parcelles [Tm6]. Le lien entre la gestion des parcelles et la gestion de l'alimentation est assuré par des modules tactiques qui regroupent un ensemble de variables et règles de décisions (générales ou circonstancielles) ; l'enchaînement de ces séquences décisionnelles finalisées (modules tactiques) et l'enchaînement des modules dans le temps, tel que le montre la figure 5, traduit la stratégie de l'éleveur. Les règles générales sont mobilisées quelle que soient les conditions ; par exemple l'achat de paille ou de bagasse servira à anticiper le manque de fourrage de

l'hiver, ou l'achat de concentrés effectué toute l'année pour soutenir une production laitière régulière quelle que soit la valeur du fourrage récolté ou pâturé. Les règles circonstancielles sont le plus souvent organisées sous forme de modules tactiques ; par exemple la récolte en balles enrubannées de faibles excédents d'herbe permet de constituer des stocks de petites dimensions qui seront mobilisés lorsque la fauche en vert ou le pâturage ne sera pas possible en période de pluies ou le week-end ; un excédent important d'herbe sera, par contre, géré en mobilisant l'entraide ou l'entreprise pour organiser un chantier d'ensilage en tas ou en balles enrubannées ; ce stock important servira à couvrir les longues périodes de déficit fourrager, notamment pour l'ensilage en tas dont la consommation ne peut être interrompue pour des raisons de dégradation de la qualité du fourrage.



ENONCE DES REGLES GENERALES OU CIRCONSTANCIELLES

Figure 5. Description conceptuelle de la gestion du système fourrager (source : Paillat, restitution des travaux en comité scientifique, 1998, non publié).

Regard critique

Si la typologie réalisée en 1996 ne correspond plus tout à fait à la réalité des élevages laitiers réunionnais actuellement, tant l'évolution du secteur laitier a été importante dans les années 2000, les fonctions attribuées à l'alimentation et à la gestion des surfaces fourragères demeurent. Tout au plus, voit-on s'affirmer de plus en plus le recours à des fourrages extérieurs et à une plus grande quantité de concentrés pour répondre à l'accroissement très important des troupeaux et au manque de foncier. La production laitière de la Réunion a atteint maintenant 24 ML (FRCA, 2010, *op. cit.*). D'autres typologies ont par la suite été réalisées sur les systèmes laitiers avec une entrée plus économique (Alary *et al.*, 2002 ; Vayssières *et al.*, 2006)⁶⁵. La thèse de Jonathan Vayssières [Tt3] mettant en œuvre une démarche de co-construction d'un modèle simulant les pratiques en élevage laitier (Vayssières *et al.*,

⁶⁵ ALARY V., MESSAD S., TACHÉ C., TILLARD E., 2002. Approche de la diversité des systèmes d'élevage laitiers à La Réunion. Revue d'Elevage et de Médecine Vétérinaire des Pays Tropicaux 55 (4), 285-297.
VAYSSIÈRES J., LECOMTE P., GUERRIN F., BOCQUIER F., VERDET C., 2006. Explaining the diversity of environmental performances according to a typology of farming practices combinations: the case of the dairy cattle breeding in Reunion Island. In: RAMIRAN 2006, 12th International Conference on "Technology for recycling of manure and organic residues in a whole-farm perspective", 11-13 September, Aarhus, Denmark, pp. 57-60.

2007)⁶⁶ s'est appuyée sur ces typologies actualisées pour choisir les exploitations à modéliser et simuler. On retrouve cependant dans ce travail de thèse, mais de façon plus approfondie grâce aux enquêtes précises réalisées sur 6 exploitations (Vayssières, 2004)⁶⁷, les principaux éléments de gestion des troupeaux, des surfaces fourragères et des stocks mis en évidence dans l'analyse des pratiques effectuée en 1996.

II.2.2. Gestion et transformation des effluents d'élevage

II.2.2.1. Des typologies pour raisonner les modes de gestion des effluents d'élevage et le risque environnemental

Objets et finalités de recherche

L'île de la Réunion présente une grande diversité de systèmes agricoles dépendant des conditions pédoclimatiques très variées et de contextes socio-économiques particuliers. Les systèmes à base de canne à sucre sont développés dans les Bas alors que les systèmes d'élevage sont installés plutôt dans les Hauts. Dans les zones de piémont, on retrouve à la fois l'élevage, la canne à sucre et les productions maraîchères et fruitières. Nous avons vu précédemment l'importance de la mobilisation des ressources pour l'alimentation ou le paillage des animaux, avec les flux de paille de canne à sucre des zones de production cannière vers les zones d'élevage. Cette situation de transfert et l'essor des productions animales (volailles, porcins, lait) beaucoup basée sur l'importation d'aliments concentrés génèrent des risques pour l'environnement liés à la gestion des déchets d'élevage, notamment dans certaines localités très enclavées des Hauts de l'île. Cette problématique devrait être de plus en plus d'actualité avec le financement prévu jusqu'en 2020 du projet DEFI « Développement, élevage, filières interprofessionnelles » (Derouand et Brod, 2010)⁶⁸, soutenu par les filières de production animale à la Réunion, qui prévoit une augmentation très notable des productions animales (+ 20 à + 50% selon les filières). Ce projet vise le maintien de la part de marché de la production locale par rapport aux importations, la consommation de produits animaux augmentant fortement avec l'augmentation de la population et le changement des habitudes alimentaires. Avec une approche systémique et afin d'appréhender ces risques, j'ai encadré des enquêtes qui ont permis de comprendre la diversité des pratiques de gestion des effluents [Rr5, Rr7, Tm3, Tm8, Tm9] ; puis une typologie, construite de manière empirique à partir des résultats d'enquêtes variées dans environ 200 exploitations et basée sur les pratiques de gestion des effluents, a été réalisée [Ca13, Rr14].

Toujours concernant l'île de la Réunion, mais de manière plus sectorielle, je me suis intéressé au bilan environnemental des systèmes d'élevage laitier, poursuivant ainsi l'analyse des systèmes fourragers présentée précédemment (cf. § II.2.1.3.). En effet, l'affouragement de base des troupeaux laitiers provient de l'herbe pâturée ou conservée, mais aussi du transfert de sous-produits de la canne à sucre et d'une quantité importante de concentrés. Le chargement animal par hectare de surface herbagère peut, en conséquence, être très élevé, atteignant dans certaines régions de l'île plus de 5 UGB/ha⁶⁹. Construire une typologie basée sur un critère d'équilibre azoté au sein de l'exploitation laitière [Tm7] nous⁷⁰ est apparu pertinent pour 1) identifier les systèmes peu efficaces et donc à risques pour l'environnement, et 2) au sein de chaque système type, repérer les pratiques conduisant à des excès azotés.

Dans un tout autre contexte, celui de l'élevage porcin dans une zone de delta au Vietnam, une démarche, détaillée ci-après, de bilan azoté et de calcul d'un risque potentiel de pollution des eaux, a également été mise en œuvre pour mieux appréhender le risque de pollution lié au développement des différentes catégories d'élevage [Tm16]. Ce travail a été conduit dans le cadre d'un projet européen

⁶⁶ VAYSSIÈRES J., KERDONCUFF M., LECOMTE P., GIRARD N., MOULIN C.H., 2007. Farmers participation in designing a Whole Farm Model. In: Farming Systems Design 2007, International Symposium on "Methodologies for integrated analysis of farm production systems", 10-12 September, Catania, Italy, Vol. 2, Field-farm scale design and improvement, pp. 237-238.

⁶⁷ VAYSSIÈRES J., 2004. L'appréhension des pratiques décisionnelles d'éleveurs par enquêtes-immersion : cas des activités à l'origine de flux d'azote en exploitations bovines laitières à la Réunion. Mémoire de DEA EMTS, INA-PG, Paris, 49 p.

⁶⁸ DEROUAND B., BROD N., 2010. Propositions de modification du programme POSEI 2011. Dossier de la Direction de l'Agriculture et de la Forêt, St Denis de la Réunion, 5 p.

⁶⁹ Unité Gros Bétail

⁷⁰ Ce travail a été conduit en collaboration avec Philippe Leterme, Pr. Agrocampus Ouest

coordonné par le CIRAD⁷¹ [Oc9]. Utilisant une méthode statistique, une typologie a également été réalisée pour classer les différents systèmes vis-à-vis du risque environnemental potentiel.

Mon objectif est ici de mettre en parallèle ces trois cas de construction de typologie en montrant les méthodes utilisées, l'adaptation aux situations étudiées et leurs intérêts et contraintes respectifs.

Intérêt scientifique

Les principaux intérêts scientifiques de cette construction de typologies sont :

- la formalisation des connaissances sur la diversité des systèmes de production quant à leur gestion des MO, ces informations pouvant être spatialisées à partir des données du recensement agricole (cas de la Réunion) ou à partir des enquêtes filières annuelles (cas du Vietnam),
- la caractérisation d'exploitations types pouvant être simulées avec des modèles de gestion et permettant de construire un plan d'expérimentation pour organiser les simulations, le but étant de tester différentes pratiques et stratégies de gestion des effluents d'élevage (cf. § II.3.1.),
- le croisement de typologies basées sur les stratégies de gestion avec des typologies des zones pédo-climatiques et des systèmes de culture associés (Saint Macary *et al.*, 2003)⁷² pour constituer un référentiel de base,
- l'élaboration de méthodes de quantification du risque environnemental, calculé à partir des excédents azotés, considérés comme perdus par les exploitations d'élevage et impactant potentiellement l'environnement (eau, atmosphère),
- des classifications des systèmes de production animale basées sur le risque pour l'environnement permettant de mieux cibler les actions de développement.

Méthodologie

Dans les 3 cas étudiés, l'analyse globale des exploitations (Capillon et Manichon, 1991)⁷³ a été utilisée en première approche pour comprendre les stratégies de production et décrire les contraintes et atouts des exploitations ; cette analyse a ensuite été complétée par un diagnostic sectoriel concernant la gestion des effluents d'élevage [Tm3, Tm16].

Une base de données spécifique à chaque situation a été constituée et le traitement des données a été effectué soit par la détermination empirique de clés et de seuils de classification dans les 2 cas de la Réunion [Rr14, Tm7] ou par une analyse statistique multivariée dans le cas du Vietnam [Tm16].

Typologie basée sur la gestion des effluents d'élevage à la Réunion

Dans le cas des systèmes diversifiés de la Réunion, la plupart des 200 enquêtes réalisées entre 1995 et 1998 (Fig. 6) ont concerné des exploitations d'élevage. Cependant, les systèmes maraîchers ou cannières associés à l'élevage ont également fait l'objet de certaines de ces enquêtes [Tm9]. La typologie a été construite par étapes successives en mobilisant plusieurs séries d'enquêtes à objectifs variés mais portant toutes pour partie sur la gestion de la matière organique [Ca13].

Etape 1. Après un échantillonnage construit pour couvrir l'ensemble des systèmes de production de la région de Salazie, une quarantaine d'exploitations a été enquêtée [Tm3]. Dans le cadre méthodologique proposé par Capillon et Manichon (1991, *op. cit.*), la gestion des effluents a été abordée de façon spécifique pour classer les exploitations. Ce travail a ainsi permis d'aboutir à une typologie des exploitations de la région de Salazie, basée sur la gestion des effluents [Tm3]. Cette première typologie a servi de base aux différents travaux menés ultérieurement.

Etape 2. Une approche similaire a été réalisée sur le site de Dos d'Ane. Alors que le cirque de Salazie regroupe plusieurs localités, le site de Dos d'Ane ne constitue qu'une seule localité. A cette échelle, il n'est pas possible de construire une typologie régionale. Les exploitations enquêtées ont donc été classées dans la typologie des exploitations de Salazie, en adaptant les trajectoires d'évolution à cette nouvelle situation [Rr5].

⁷¹ E3P project: Animal production intensification in Vietnam and environmental protection - VN/Asia-ProEco/OO2(91211).

⁷² SAINT MACARY H, MEDOC J.-M., CHABALIER P.-F., 2003. Systèmes de culture de la Réunion – Typologie, spatialisation et éléments pour un référentiel. In F. Guerrin, J.-M. Paillat (éditeurs scientifiques), 2003. Modélisation des flux de biomasse et des transferts de fertilité - cas de la gestion des effluents d'élevage à l'île de la Réunion. Restitution des travaux de l'Atp 60/99. Actes du séminaire des 19-20 juin 2002, Montpellier, France. Cirad, Colloques, Cédérom.

⁷³ CAPILLON A., MANICHON H., 1991. Guide d'étude de l'exploitation agricole. In : Relance agronomique, INA-PG/APCA, 65 p.

Etape 3. Une troisième étude concernant la gestion des effluents a été réalisée dans la région des plaines d'altitude et les régions de piémont du sud de l'île qui correspondent à l'aire principale de production laitière. Contrairement aux études précédentes, l'entrée n'était donc pas régionale, mais de type « filière », avec l'objectif de construire une typologie propre aux systèmes laitiers, décrite par le 2nd cas présenté ci-après. Cependant, des éléments de cette typologie, caractérisant spécifiquement la gestion des effluents dans les systèmes laitiers [Tm7], ont été repris pour compléter la typologie de base préalablement construite.

Etape 4. D'autres enquêtes plus approfondies permettant de construire les modèles d'action (Duru *et al.*, 1988)⁷⁴ des agriculteurs ont permis de mieux différencier les stratégies des systèmes diversifiés de la Réunion (cf. § II.2.2.2.) [Rr11, Tm8, Tm9] ; ces enquêtes ont été menées dans 19 exploitations du Sud de l'île. Les enquêtes de Renault et Paillat [Rr9] dans 56 exploitations de Grand-Ilet, localité du cirque de Salazie, et celles de Vimeux (1998)⁷⁵ dans 9 exploitations en diversification maraîchère des Hauts de l'Ouest, consommatrices de MO, ont également été mobilisées. Ces enquêtes approfondies ont permis de mieux différencier les types initiaux sur le plan de la gestion des MO. La typologie s'est donc à nouveau enrichie.

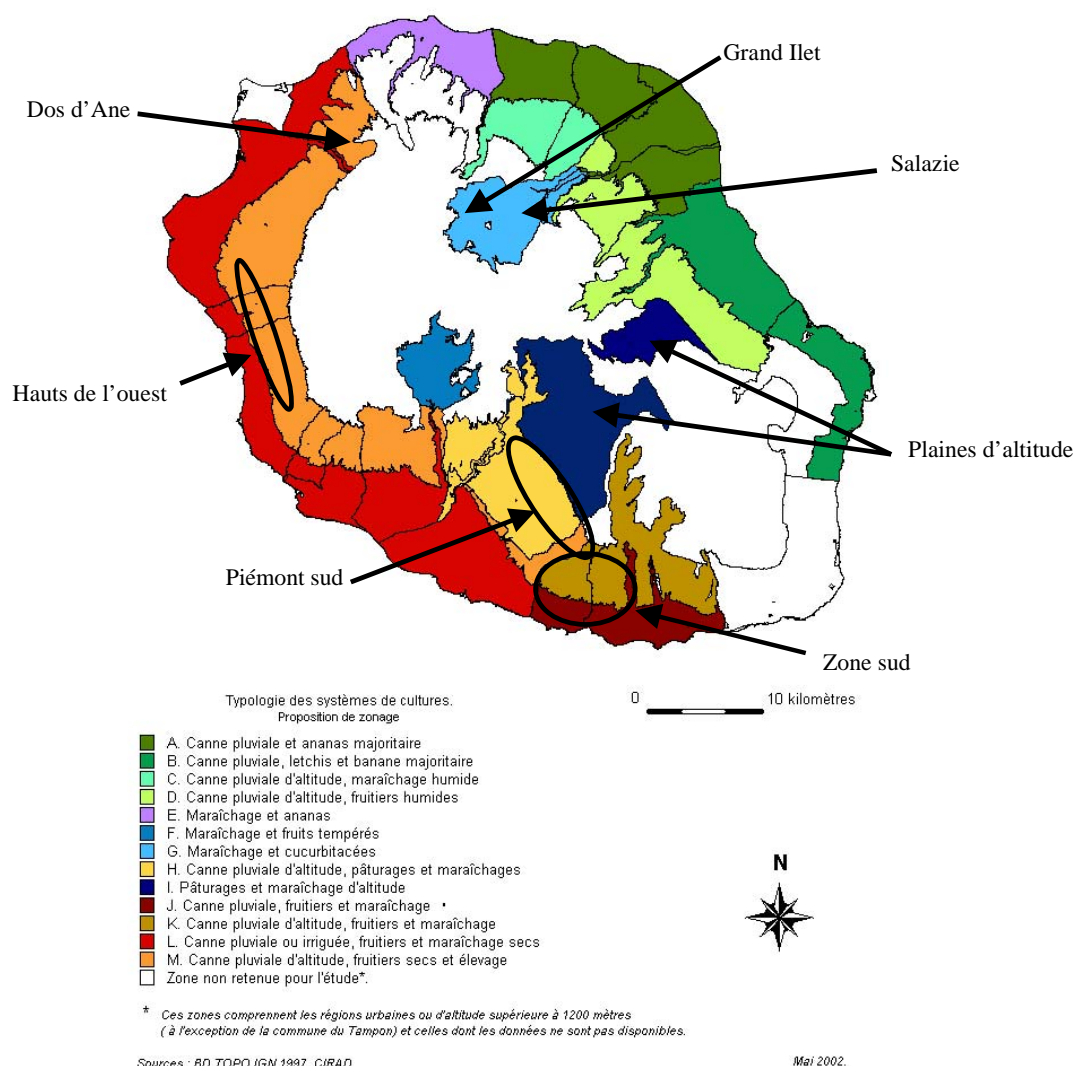


Figure 6. Localisation des enquêtes sur la carte des principales régions agricoles de l'île [Ca13] (d'après Saint Macary *et al.*, 2003, *op. cit.*).

⁷⁴ DURU M., PAPY F., SOLER L.-G., 1988. Le concept de modèle général et l'analyse du fonctionnement de l'exploitation agricole. C.R. Acad. Agric. Fr., 74(4) : 81-93.

⁷⁵ VIMEUX L., 1998. La gestion de la matière organique dans les exploitations en diversification maraîchères des Hauts de l'Ouest de l'île de la Réunion. Mémoire de fin d'étude, Isab, Beauvais, 61 p.

Cette étude sur le cas du secteur laitier réunionnais s'est appuyée sur la typologie des systèmes fourragers présentée précédemment (cf. § II.2.1.3.) [Tm5] pour choisir les exploitations à enquêter (21) afin de représenter les différentes catégories d'éleveurs selon leur diversité d'une part et l'importance de leur production laitière d'autre part. Des bilans d'azote ont été calculés pour les 21 exploitations, à partir d'une quantification la plus exhaustive possible des flux d'azote entrant et sortant de l'exploitation, ainsi que des flux d'azote internes à l'exploitation ; en considérant les différents compartiments que sont les animaux, les stocks d'effluents et les prairies (Simon et Le Corre, 1992)⁷⁶. A partir de cette quantification de soldes d'azote, la méthodologie de construction de la typologie a consisté à définir des clés de classification et des seuils en se basant sur les principaux critères d'intensification de la production laitière [Tm7].

Dans le cas du Vietnam, les flux de matières et d'azote entre les différentes entités de l'exploitation porcine : habitation, élevage, étang, cultures sèches, rizière, jardin (Fig. 7) ont été quantifiés pour les 43 exploitations enquêtées, aussi précisément que possible, avec un niveau de risque associé dépendant du mode d'utilisation des effluents. Les données quantitatives ont fait l'objet d'une analyse en composante principale (ACP) (logiciel SPAD, Decisia, 2003)⁷⁷. La typologie a ainsi été construite par étapes :

- 1) en calculant le flux d'azote vers l'environnement résultant des différents flux précédemment quantifiés ; ce flux résultant constitue la variable à expliquer ;
- 2) en choisissant les variables pertinentes non redondantes et explicatives, permettant de rendre compte du risque environnemental potentiel (production animale, flux d'effluent non maîtrisés, superficie de l'exploitation et des étangs ...) ;
- 3) en procédant par plusieurs ACP successives conduisant à chaque fois à des regroupements d'individus [Tm16], tout en conservant l'influence des variables les plus discriminantes.

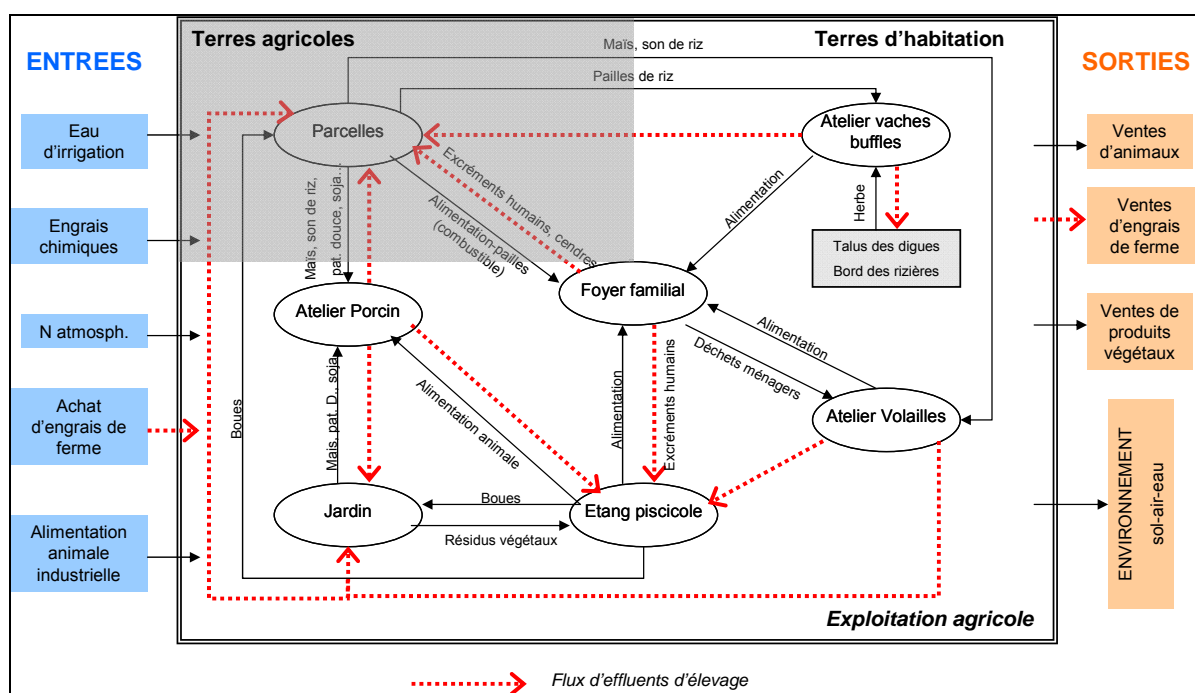


Figure 7. Principaux flux d'azote observés dans une exploitation porcine de la province de Thaï Binh. Les terres agricoles sont souvent assez éloignées (plusieurs km) des terres de l'habitation qui comprend les élevages équipés parfois d'un digesteur méthanique, un étang et un jardin [Tm16].

⁷⁶ SIMON J.C., LE CORRE L., 1992. Le bilan apparent de l'azote à l'échelle de l'exploitation, méthodologie, exemples de résultats. *Fourrages*, 129 : 79-94.

⁷⁷ DECISIA, 2003. SpadVersion: MN: SPAD 5.6.0. Copyright 1982-2009.

Principaux résultats

Typologie basée sur la gestion des effluents d'élevage à la Réunion

L'analyse globale de l'exploitation et le diagnostic sectoriel sur la gestion des effluents d'élevage nous a permis de classer les exploitations en 3 grands types et 9 sous-types avec les critères suivant : le rapport UGB/SAU⁷⁸ ($< 2,5$; compris entre 2,5 et 15 ; > 15), la taille de l'élevage (UGB < 5 ; compris entre 5 et 25 ; > 25), la surface (SAU $< 2,5$ ha ; $> 2,5$ ha) et le rapport de surface consacrée au maraîchage (M) ou aux cultures pérennes par rapport à la SAU (M/SAU $< 0,3$, compris entre 0,3 et 0,7, $> 0,7$) [Ca13]. Les enquêtes approfondies ont ensuite servi à mieux différencier les types sur le plan de la gestion des MO. Pour les exploitations de type I (UGB/SAU > 15 ; 2 sous-types), présentant les plus forts risques potentiels de rejet direct d'effluents dans l'environnement, la nature des effluents, liquide ou solide, et la taille du cheptel sont déterminantes pour différencier 8 exploitations types. Pour les exploitations de type II (UGB/SAU < 15 et UGB > 5 ; 3 sous-types), le type d'élevage (bovins ou hors sol) et la localisation (zone cannière, de piémont, d'altitude) permettant une plus ou moins bonne valorisation des effluents selon leur nature (liquide ou solide) sont déterminants et permettent de différencier 12 exploitations types. Pour les exploitations de type III (UGB < 5 ; 4 sous-types), le rapport de surface consacrée au maraîchage par rapport à la SAU et la taille de la sole cannière sont les critères discriminant de 6 exploitations types.

Grâce à ces différenciations, on aboutit à 26 exploitations types [Rr14], pour lesquelles j'ai décliné, à partir des données quantifiées acquises dans les 200 exploitations, des valeurs représentatives pour les variables structurelles, les stratégies actuelles de gestion des effluents d'élevage et les stratégies alternatives possibles [Ca13, annexes]. Ces dernières sont ordonnées en quatre niveaux : 1) modification du pilotage et de la planification des épandages (par ex. : dates d'épandage, priorités entre cultures ou entre effluents, temps alloué à l'épandage), 2) modification d'éléments structurels (par ex. : taille de la fosse de stockage, équipement d'épandage), 3) modification partielle du mode de production (par ex. : assolement) et de gestion des effluents (par ex. : type d'effluent, élargissement du plan d'épandage par le prêt de terres), 4) changement de système de production permettant de s'identifier à une autre exploitation type de la classification (par ex. : modification structurelle de la surface, du type de cultures ou d'animaux, de la taille du cheptel, des bâtiments et modes de stockages ...) [Ca13].

Typologie basée sur le bilan azoté des systèmes laitiers de la Réunion

Quatre variables principales (production laitière par vache, apport de concentré par vache, taille de la surface fourragère, exportation des effluents) définissant différents niveaux d'intensification ont permis de classer les exploitations laitières réunionnaises. La plupart des exploitations présente un excédent d'azote. Cet excédent est surtout dû à un déséquilibre de l'apport en azote par rapport aux apports d'énergie pour couvrir les besoins des troupeaux. Ceci entraîne une forte restitution d'azote dans les déjections. On a également constaté des apports d'engrais souvent trop importants. L'existence de cet excédent peut avoir des conséquences importantes au niveau environnemental et permet de définir quatre niveaux de risque (Fig. 8) liés à l'intensification de la production laitière (production laitière et quantité de concentrés par vache) et de la surface fourragère (taille de la SFP). En moyenne, les vaches laitières des exploitations enquêtées produisaient 117 kg N/UGB/an, dépassant ainsi les références habituellement utilisées par le CORPEN de 73 kg N/UGB/an (Dexel, 1996)⁷⁹ ; en 2003, cette référence a été réévaluée à 85 kg N/UGB/an pour une vache laitière produisant 6000 kg de lait par an. Ce plus fort rejet d'azote reste explicable d'une part par les régimes de la Réunion composés essentiellement d'herbe pâturée ou ensilée qui conduisent potentiellement à des excédents azotés (Van Horn *et al.*, 1996 ; Dourmad *et al.*, 1997 ; Simon *et al.*, 1997)⁸⁰ et, d'autre part, à un niveau d'apport de concentrés élevés et corrigeant très mal les déséquilibres de la ration de base.

⁷⁸ Unité gros bétail / Surface agricole utilisée

⁷⁹ Institut de l'Elevage, 1996. -DEXEL : Guide de l'utilisateur. Tableaux de référence. Institut de l'Elevage, 60 p.

⁸⁰ VAN HORN H.H., NEWTON G.L., KUNKLE W.E., 1996. Ruminant nutrition from an environmental perspective: factors affecting whole-farm nutrient balance. *Journal of animal science*, 74, 3082-3102.

DOURMAD J.-Y., LETERME P., MORVAN T., PEYRAUD J.-L., VERTES F., 1997. Les flux d'azote dans les exploitations d'élevage. *In* : RIOU C., BONHOMME R., CHASSIN P., NEVEU A., PAPY F., L'eau dans l'espace rural : production végétale et qualité de l'eau, INRA, Paris, 281-301.

SIMON J.C., PEYRAUD J.L., DECAU M.L., DELABY L., VERTES F., DELAGARDE R., 1997. Gestion de l'azote dans les systèmes prairiaux pâturés permanents ou de longue durée. *In*: Maîtrise de l'azote dans les agrosystèmes, INRA, 19-20 nov. 1996, Reims, 201-216.

| risques | Kg N / ha SFP | SFP (ha) | Concentrés (t/vache/an) | PL (l/vache/j) |
|-------------------------------|------------------|--|--|--|
| Très élevés SFP | > 500 | < 5 > 17 | > 3.5 3 - 3.5 | > 18 > 18 |
| Elevés SFP / stocks | > 300 | < 10 10 - 17 | > 3.5 2.5 - 3 | > 18 13 - 18 |
| Moyens SFP / stocks | > 200 | < 5 5 - 17 > 17 | < 2.5 < 2.5 2.5 - 3 | < 13 13 - 18 > 18 |
| Assez faibles SFP | < 200 | 10 - 17 | 2.5 - 3 | > 18 |

Figure 8. Identification des principaux risques pour l'environnement, estimés par l'excédent du bilan azoté (kg N ha⁻¹ SFP), et localisés sur la gestion des stocks d'effluents et de la SFP : surface fourragère principale (source : Paillat, restitution de travaux en comité scientifique, 1998, non publié).

Globalement, les systèmes laitiers étudiés en 1998 n'étaient pas suffisamment efficaces pour produire du lait et le recyclage des effluents était très peu optimisé. Ce travail a permis de lister des améliorations et de proposer des pistes de recherches sur les plans zootechniques, agronomiques et organisationnels :

- utilisation d'outils de pilotage de la ration 1) pour mieux équilibrer les besoins du troupeau et les apports en UFL (unité fourragère pour le lait) et PDI (protéines digestibles intestinales) par les fourrages produits, 2) pour mieux gérer le pâturage,
- ajustement de la fertilisation minérale aux besoins des plantes, ce qui nécessite de renforcer la connaissance de ces besoins à la Réunion qui peuvent être très différents selon le type de fourrage, la nature du sol, l'altitude et les possibilités d'intensification (topographie notamment),
- substitution des engrais minéraux par les effluents tout en réduisant les pratiques à risque concernant l'épandage, une meilleure connaissance des teneurs en N, P, K des effluents bovins est attendue,
- amélioration des équipements, notamment les structures de stockage,
- personnalisation du conseil aux éleveurs,
- raisonnement de la gestion des effluents à l'échelle territoriale pour profiter des complémentarités entre les filières d'élevage et de production végétale.

Typologie basée sur le risque de pollution des eaux par les élevages porcins au Vietnam

Les systèmes porcins du Vietnam présentent une gestion complexe des effluents entre différentes productions : riziculture, cultures de saison sèche, jardin familial, étang piscicole (Fig. 7). L'analyse conjointe du fonctionnement global de l'exploitation et des risques environnementaux ont permis de mettre en évidence des déterminants des pollutions liées à des contraintes de structure et de gestion de l'exploitation. Si les effluents solides (lisier raclé, fumier) sont systématiquement valorisés, ce n'est pas le cas des effluents liquides (eaux d'élevages, eaux résiduelles issues de la méthanisation, lisier liquide) qui sont à l'origine de toutes les pollutions observées. Celles-ci sont préoccupantes dans une région de delta où les prélèvements de l'eau de consommation sont rarement éloignés des zones habitées donc des élevages porcins qui par ailleurs connaissent un fort développement en raison de l'accroissement de la population vietnamienne et de l'ouverture de marchés extérieurs (Porphyre and Nguyen Que Coi, 2006)⁸¹. Or on observe une moindre séparation des phases solide-liquide avec un agrandissement de la taille de l'élevage, particulièrement lorsqu'il y a un digesteur méthanique sur le terrain de l'habitation (qui comprend souvent, la maison, les bâtiments d'élevage, un jardin, un étang de

⁸¹ PORPHYRE V., NGUYEN QUE COI (Editors), 2006. Pig Production Development, Animal Waste Management and Environmental Protection: a Case Study in Thai Binh Province, Northern Vietnam. PRISE publications, France.

très petite taille ; les cultures sont le plus souvent situées sur un terrain éloigné). Le développement de la filière porc pourrait donc être compromis par la difficile valorisation des effluents liquides, qui contiennent environ 1/3 de l'azote rejeté par l'élevage porcin, sur les jardins, seuls « puits potentiels » situés à proximité de l'élevage dans les petites exploitations qui représentent la majeure partie des producteurs de porcs [Tm16].

Différentes variables (tableau 2) caractérisant le risque de pollution potentiel ou permettant d'expliquer ce risque ont été calculées à partir des enquêtes, pour constituer la base de données utilisée pour les ACP. Quatre niveaux de risque ont été distingués selon la valeur de la variable POLL (pollution) : nul, faible, moyen et élevé pour $POLL=0$, compris entre 0 et 100, compris entre 100 et 250 et supérieur à 250 kg N par an, respectivement. La variable POLL a été calculée en multipliant les quantités d'effluent perdues, *i.e.* non valorisées par les cultures, par un coefficient de destination « estimateur » du risque : 1 pour les rejets directs dans les cours d'eau, 0,75 pour les rejets en étang et 0,5 pour les rejets sur le sol. Ce coefficient a été fixé arbitrairement pour permettre une hiérarchisation des risques d'impact sur la ressource en eau du delta, tels qu'ils nous sont apparus lors des enquêtes et aux dires des acteurs (éleveurs, techniciens des organisations professionnelles). Les différentes ACP ont permis de faire des regroupements d'exploitations et de définir trois variables explicatives déterminantes (Fig. 9) :

1. la taille de l'élevage porcin, dont le rôle est majeur pour la quantité de rejets et donc la pollution potentielle, permettant de distinguer 4 types principaux (le type I' est une extension du type I),
2. la surface de l'étang permettant de distinguer des sous-types (A),
3. la surface totale de l'exploitation qui distinguent les sous-types B et C.

Tableau 2. Variables prises en compte dans les analyses en composantes principales (ACP) [Tm16]

| Variables | Description | Remarques |
|--|---|--|
| Production d'effluents d'élevages | | |
| PVPCP | Poids Vif équivalent Porcs Charcutiers Produits | |
| QPRO | Quantités de déjections produites annuellement sur l'exploitation | |
| Les puits de consommation d'effluents | | |
| STOT | Surface Agricole Totale | <i>Les surfaces en étang et cultures sèches considérées individuellement attestent d'une diversification des productions sur l'exploitation.</i> |
| RIZ | Surface en riz | |
| CS | Surface en cultures sèches | |
| ETA | Surface Etang | |
| BESTH | Besoins théoriques | |
| Gestion de la matière organique | | |
| PER | Quantités de déjections perdues annuellement de l'exploitation | QVAL = QPRO - PER |
| QVAL | Quantités de déjections valorisées annuellement sur l'exploitation | |
| BGA | Quantités de déjections traitées annuellement par le digesteur biogaz | |
| Le risque environnemental | | |
| POLL | Pollution | |
| ISURC | Indice de surcharge | |

Si la charge animale (QPRO/STOT, tableau 2) est le principal déterminant du risque potentiel de pollution des eaux, il ne le reflète que partiellement. Des contraintes de gestion des effluents d'élevage et des contraintes structurelles ont aussi été mises en évidence. L'orientation des pratiques de gestion vers la réduction au maximum de la fraction azotée des effluents liquides et l'exportation des produits solides sont à encourager dans les exploitations présentant des risques potentiels élevés.

Ce travail a permis de faire un bilan sur la diversité des pratiques de gestion des effluents porcins, travail encore inédit dans la province de Thai Binh [Oc9]. Il a également permis de mettre en évidence les déterminants d'un risque environnemental potentiel (ici la pollution des eaux de surface) qui, à terme, pourra s'opposer au développement de la filière porcine aujourd'hui en plein essor. Enfin, il propose un outil de classification des exploitations en regard du risque de pollution des eaux généré par les effluents d'élevage. Des solutions adaptées à chaque type d'exploitation peuvent ainsi être proposées.

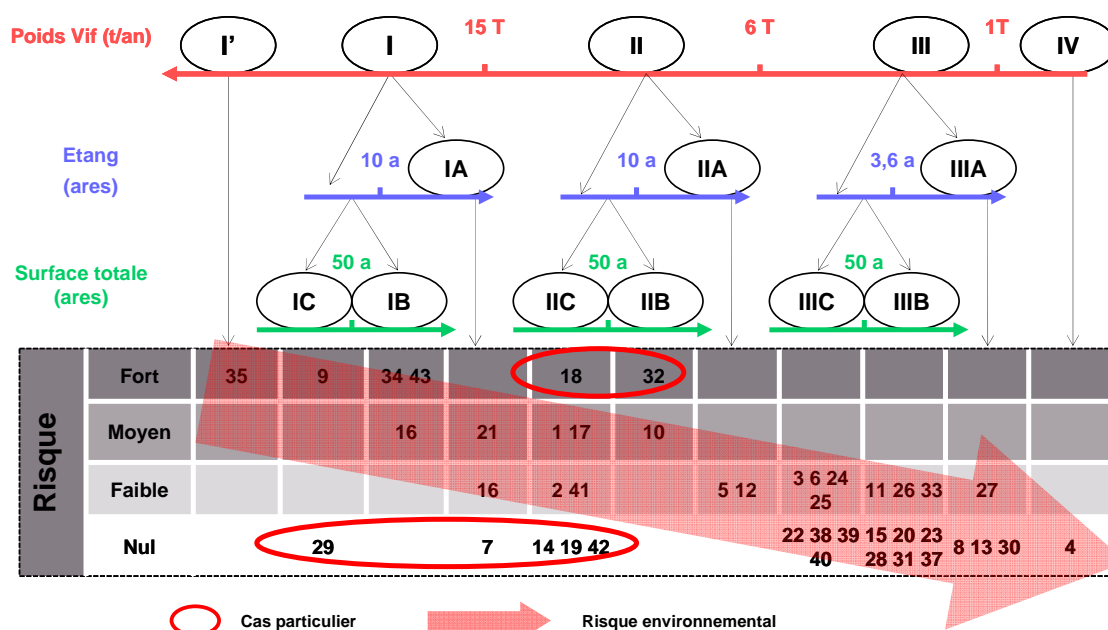


Figure 9. Classification des exploitations porcines enquêtées (identifiant numérique) de la province de Thaï Binh et risque de pollution potentiel associé [Tm16].

Regard critique

Ces trois typologies, qui concernent 1) la gestion des effluents d'élevage à la Réunion, 2) le bilan azoté des exploitations laitières de la Réunion et, 3) le risque de pollution des eaux par les effluents porcins dans la province vietnamienne de Thaï Binh, permettent de classer les exploitations par rapport à un risque potentiel d'impact sur l'environnement. Celui-ci est fortement déterminé par les structures des exploitations (tailles des cheptels, surfaces cultivées ...) dont résulte, en particulier, le chargement animal par rapport à la surface épandable, mais, également, par l'intensification du troupeau et des surfaces (achats d'aliments concentrés et d'engrais) et par la gestion des effluents. Le classement, sur la base de clés et de seuils déterminés empiriquement, a été possible à la Réunion en raison de la bonne connaissance générale des exploitations et des systèmes d'élevage en particulier (enquêtes approfondies dans différentes localités). Le nombre élevé d'exploitations enquêtées a permis de faire des groupes suffisamment différenciés et de calculer des seuils de classification. Le traitement statistique n'a pas été possible en raison de l'hétérogénéité des données provenant d'enquêtes très variées. Seule une analyse qualitative s'est avérée réalisable à partir de la base de données constituée. Cette classification orientée vers la gestion des matières organiques ne permet pas réellement de quantifier un risque pour l'environnement ; en effet, aucune des variables calculées ne représente, par exemple, les flux d'azote dans le système. Elle a, en revanche, permis de décrire suffisamment précisément les systèmes d'élevage pour ensuite simuler avec le modèle MAGMA (Guerrin, 2001)⁸² différentes stratégies de gestion des effluents, existantes ou alternatives (cf. § II.3.1.). Ceci a été réalisé pour une exploitation type [Ca14]. Dès lors, les résultats de simulations permettent, entre autres, de quantifier le risque pour l'environnement, identifié par exemple par les flux d'effluents (et d'azote) débordant les stocks ou épandus en excès sur certaines cultures (cf. § II.3.3.). Ce travail mériterait d'être poursuivi pour l'ensemble des exploitations de la typologie.

La typologie plus spécifique des systèmes laitiers réunionnais et celle des systèmes porcins au Vietnam s'appuient sur le calcul de variables permettant d'estimer le risque : le bilan apparent de l'azote à l'échelle de l'exploitation d'une part, le flux résiduel d'effluent vers l'environnement d'autre part. Le traitement statistique des données permettant de faire plus aisément des regroupements d'exploitations a été possible au Vietnam en raison du nombre assez important d'exploitations (43), contrairement au secteur laitier réunionnais (21). Cependant, la difficulté réside dans ces deux cas

⁸² GUERRIN F., 2001. Magma: A model to help manage animal wastes at the farm level. Comp. and Elect. in Ag., 33(1): 35-54.

dans la précision de calcul des indicateurs retenus, qui dépend fortement de la qualité des informations recueillies dans les enquêtes.

II.2.2.2. Construction d'un modèle d'action pour la gestion des matières organiques

Objet et finalités de recherche

Après l'identification des types de gestion des effluents d'élevage et des risques associés, poursuivant ainsi l'analyse des systèmes de production de la Réunion, nous avons cherché à mieux comprendre et analyser cette gestion pour l'agriculteur. Celle-ci consiste à obtenir, conserver, éventuellement transformer, utiliser et redistribuer, dans le temps et l'espace, des MO issues des élevages de son exploitation ou d'autres exploitations. Cette démarche de modélisation conceptuelle de la gestion des effluents d'élevage s'inscrit dans les courants de recherche en gestion, où la modélisation est définie comme « une démarche visant à identifier des problèmes de décision, à les représenter pour en favoriser la résolution » (Thépot, 1995)⁸³. Ce travail de conceptualisation, conduit avec Christine Aubry, ingénieur de recherche à l'INRA UMR SADAPT (Aubry, 2007)⁸⁴ a débouché sur plusieurs publications [Ai4, Ca7, Rr11].

Intérêt scientifique

Deux intérêts scientifiques principaux seront retenus pour ce travail :

- la formalisation des connaissances sur les décisions et actions des agriculteurs, dans le cas de la gestion des effluents d'élevage, avec l'élaboration d'un modèle d'action suffisamment générique,
- la conceptualisation d'une représentation conduisant à la construction de modèles mathématiques et informatiques, ayant pour objectif de tester différentes stratégies de gestion des effluents.

Méthodologie

Le « modèle d'action » de l'agriculteur est la représentation qu'un observateur extérieur peut donner du fonctionnement décisionnel de l'agriculteur. Cette approche a déjà été utilisée pour représenter le management de cultures annuelles et pérennes (Attonaty *et al.*, 1993 ; Aubry *et al.*, 1998)⁸⁵, l'élevage et le pâturage (Bellon *et al.*, 2001; Dounias *et al.*, 2002)⁸⁶, la gestion de ressources telle que l'irrigation (Le Gal et Papy, 1998)⁸⁷. Les représentations conceptuelles obtenues correspondent le plus souvent à de la planification tactique (Fig. 5, cf. § II.2.1.3), mais certains de ces exemples relèvent de décisions plus stratégiques. La représentation simultanée de ces deux niveaux de planification se retrouve également dans les travaux conduits par Mc Cown (2002)⁸⁸ pour la gestion technique des cultures. Appliquée au cas de la gestion des effluents d'élevage, cette modélisation conceptuelle (Papy, 1994 ; Aubry *et al.*, 1998, *op. cit.*)⁸⁹ comprend une identification et une catégorisation (i) des variables décisionnelles, (ii) des règles de décision, (iii) des échelles spatiales et temporelles auxquelles l'agriculteur conçoit ces règles et ces variables, et (iv) des indicateurs de pilotage technique. Parmi les variables décisionnelles, nous distinguons les variables structurelles, qui relèvent des décisions

⁸³ THEPOT J., 1995. La modélisation en sciences de gestion ou l'irruption du tiers. *Revue Française de Gestion*, 102 : 66-70.

⁸⁴ AUBRY C., 2007. La gestion technique des exploitations agricoles, composante de la théorie agronomique. Mémoire d'habilitation à diriger des recherches, Institut national polytechnique de Toulouse, 94 p.

⁸⁵ ATTONATY J.M., CHATELIN M.H., MOUSSET J., 1993. A Decision Support System based on farmers knowledge to assess him in decision making about work organisation and long term evolution. *In*: International Seminar of CIGR Models Computer Programs and Expert Systems for Agricultural Mechanization, Florenza, Italy, 1–2 October, 1993, pp. 8–22.

AUBRY C., PAPY F., CAPIILLON A., 1998. Modelling decision-making processes for annual crop management. *Agricultural Systems*, 56(1): 45-65.

⁸⁶ BELLON S., LESCOURET F., CALMET J.P., 2001. Characterisation of apple orchard management system in a french mediterranean vulnerable zone. *Agronomie* 21 (3), 203–213.

DOUNIAS I., AUBRY C., CAPIILLON A., 2002. Decision-making processes for crop management on African farms: modelling from a case study of cotton crops in northern Cameroon. *Agricultural Systems* 73, 233–260.

⁸⁷ LE GAL P.Y., PAPY F., 1998. Co-ordination processes in collectively managed cropping systems: double cropping of irrigated rice in Senegal. *Agricultural Systems* 57 (2), 135–159.

⁸⁸ MCCOWN R., 2002. Changing systems for supporting farmers-decisions: problems, paradigms and prospects. *Agricultural Systems*, 74(1):179-220.

⁸⁹ PAPY F., 1994. Working Knowledge concerning technical systems and decision support. *In*: J.B. Dent & M.J. McGregor (Eds.), *Rural and Farming Systems Analysis, European Perspectives*, Cab International, UK, pp. 222-235.

stratégiques, et les variables de gestion qui décrivent la manipulation et l'utilisation des effluents. Ce sont surtout les variables de gestion, que nous avons identifiées et classées à partir des enquêtes approfondies (3 à 5 heures par exploitation en 2 ou 3 visites) dans 19 exploitations de la zone sud de l'île, choisies pour leur diversité au regard de la gestion de la MO. Trois autres séries d'enquêtes approfondies en exploitations, réalisées depuis 1995, ont été mobilisées pour compléter les règles de décision et ainsi affiner le modèle conceptuel (Fig. 6 ; § II.2.2.1.) : 9 exploitations maraîchères des Hauts de l'Ouest (Vimeux, 1998, *op. cit.*), les 56 exploitations porcines de Grand-Ilet [Rr9] et 30 exploitations de la zone sud enquêtées plus spécifiquement sur les pratiques d'approvisionnement en MO ou d'exportation vers d'autres exploitations [Rr11].

Principaux résultats

Pour schématiser la gestion de la MO au sein de l'exploitation de la Réunion, il est pertinent de considérer trois grandes entités fonctionnelles : la production d'effluents, la logistique (gestion des stocks) et la distribution des effluents. Pour chacun de ces modules, les variables décisionnelles, structurelles et de gestion, les règles de décision et les éventuels indicateurs de pilotage ont été explicités. Les enquêtes réalisées ou, dans certains cas, les connaissances expertes, ont permis de donner des valeurs quantitatives à certaines de ces variables ou des contenus à certaines de ces règles, de portée relativement générique [Ai4].

Le module de production [Ai4] décrit la génération des effluents au cours du temps en quantité, rythme et en qualité à partir des variables structurelles concernant le troupeau et les bâtiments d'élevage. Aucune règle de gestion n'est mobilisée dans ce module qui dépend essentiellement du type d'animal, de son stade physiologique et du type de logement déterminant la production de lisier, fumier ou purin. Plusieurs types de matières organiques peuvent ainsi être produits pour un même élevage. Le paramétrage de ce module a été réalisé à partir des données de Ziegler et Héduit (1991)⁹⁰ actualisées avec les références du Dexel (Institut de l'Elevage, *op. cit.*) [Ca7]. Si l'estimation de l'excrétion azotée est assez fiable à partir de ces références, les masses et volumes produits peuvent différer nettement des conditions métropolitaines. Cependant, en l'absence de références locales pertinentes, nous avons considéré des valeurs de production d'effluent semblables ; le guide de la fertilisation organique à la Réunion (Chabaliér *et al.*, 2006)⁹¹ paru récemment permettrait d'affiner ces données.

Le module de logistique [Ai4] décrit les modalités d'évacuation des effluents depuis les bâtiments d'élevage, leur stockage et leur vidange. Les règles diffèrent selon la nature liquide ou solide de l'effluent qui conditionne le mode d'évacuation (écoulement direct, raclage ou transport avec une remorque). Une règle d'attribution permet d'orienter les effluents, en quantité et qualité, vers un des modules de distribution. Des règles de déclenchement d'opérations sont activées par l'atteinte de seuils (date d'épandage sur les cultures ou d'apport à la plateforme pour le compostage, niveau de lisier dans la fosse).

Le module de distribution [Ai4] décrit les utilisations possibles des quantités produites : épandage sur les cultures, transformation ou exportation hors de l'exploitation. La transformation par compostage est une des utilisations possibles des effluents, mais les produits compostés sont gérés à leur tour comme un effluent produit. Les transferts d'effluents entre exploitations comprennent des flux d'importation gérés par le module logistique et des flux d'exportation générés par le module de distribution.

L'épandage sur les cultures est régi par de nombreuses variables et règles de décision :

- allocation des effluents aux cultures (certaines cultures ne pouvant recevoir de lisier par exemple),
- priorité dans l'allocation aux cultures,
- ouverture et fermeture d'une fenêtre temporelle d'épandage (dépendant des cultures et parfois de contraintes réglementaires),
- déclenchement d'épandage à partir d'événements (par exemple, la récolte pour la canne à sucre ou la préparation du sol pour les cultures maraîchères),
- faisabilité de l'épandage dépendant de la disponibilité en matériel et du climat,
- modalités de réalisation des épandages (matériel, dose d'épandage, vitesse d'exécution).

En règle générale, ce sont les contraintes propres aux cultures qui régissent les apports (date, dose, modalités), cependant, on a pu constater l'existence d'une règle de pilotage par les stocks qui est mise

⁹⁰ ZIEGLER D., HEDUIT M. (1991). Engrais de ferme - Valeur fertilisante, gestion, environnement. Document technique, ITP, ITEB, ITCF, Paris, 35 p.

⁹¹ CHABALIER P., VAN DE KERCHOVE V., SAINT MACARY H., 2006. Guide de la fertilisation organique à La Réunion. Montpellier : CIRAD, 302 p.

en œuvre de façon variable au cours de l'année selon la taille des stockages, l'assolement et les conditions climatiques. Cette règle, très souvent mobilisée par les exploitations ayant un chargement élevé (par exemple les types I ou IIb de notre typologie [Ca13], cf. § II.2.2.1.), montre l'existence chez les agriculteurs de règles d'urgence et d'un ensemble de décisions d'anticipation, notamment pour la dose épandue sur prairie ou canne à sucre, pour limiter le risque d'occurrence de situations vécues comme perturbatrices. Le débordement des fosses ou la vidange à la ravine, souvent constatée dans le passé dans les zones enclavées à très faible surface épandable (cirques) devient aujourd'hui assez rare. De ce point de vue, la situation a favorablement évolué à la Réunion vers la fin des années 1990. Cependant, ces apports non planifiés engendrent un autre problème majeur qui est l'épandage de doses très importantes d'effluents sur les cultures, notamment de lisier sur canne à sucre. Ce phénomène très général rend encore plus pertinente l'évaluation des impacts agronomiques et environnementaux de la gestion des effluents. Deux activités essentielles de la gestion des effluents dans une exploitation, l'épandage et le compostage sur lesquelles nous reviendrons (cf. § II.2.2.3. et II.2.2.4.), devront être particulièrement évaluées car elles sont au cœur de la maîtrise des effluents d'élevage et du bouclage des éléments carbone et azote entre la production animale et la production végétale :

- l'épandage consiste à apporter les excès d'azote générés par les troupeaux aux cultures, on s'interroge alors sur l'efficacité de cet apport et son innocuité pour l'environnement, avec les risques de transfert de cet azote vers l'atmosphère (volatilisation) ou l'eau (lixiviation),
- le compostage constitue un processus inverse, puisqu'il s'agit d'apporter du carbone (venant de déchets ligno-cellulosiques) pour immobiliser l'azote des effluents sous une forme organique progressivement disponible pour les cultures ; on s'interrogera également sur les transferts vers l'atmosphère (volatilisation, dénitrification) d'une telle pratique qui permet de différer dans le temps et l'espace les apports de matières organiques.

Regard critique

Nous avons formalisé les principales règles de décisions utilisées par les agriculteurs pour gérer les matières organiques au sein de leur exploitation et pour transférer ces matières organiques vers d'autres exploitations. La présentation de ce « modèle d'action » sous forme de modules permet de mieux comprendre et représenter les décisions de l'agriculteur. Cependant, ces entités décisionnelles ne sont pas aussi séparées dans la réalité et nous avons vu les liens qui permettent de passer d'un module à l'autre, notamment à travers les règles d'arbitrage pour l'utilisation des effluents produits.

Dans l'objectif de simuler le fonctionnement d'une exploitation donnée, il est préférable de procéder par enquête pour renseigner les différentes modalités prises par les variables. On devra néanmoins souvent recourir à des valeurs par défaut pour renseigner certaines variables, car l'agriculteur ne connaît pas toujours tous les paramètres de gestion des effluents dans son exploitation. De même, pour simuler des scénarios de gestion par grands types d'exploitation, il n'est pas nécessaire de connaître précisément les modalités prises par les variables dans les exploitations individuelles. C'est pourquoi, autant que possible, nous avons donné des valeurs par défaut qui peuvent être utilisées en l'absence de données plus précises [Ca7]. Reste que certaines valeurs, notamment pour les variables structurelles devront être renseignées par enquêtes ou à partir de données statistiques lorsqu'elles existent, par exemple, dans les fichiers des organismes de développement ou de la DAF (la clause de confidentialité rend cependant souvent difficile l'accès à des données individuelles).

Cette conceptualisation de la gestion des matières organiques dans les exploitations réunionnaises [Ai4] a constitué la base de la réalisation des modèles informatiques MAGMA (Guerrin, 2001, *op. cit.*) et BIOMAS [Ai2, Ca8] qui visent pour MAGMA, l'aide à la gestion des matières organiques en agriculture au niveau d'une exploitation de polyculture élevage et, pour BIOMAS, le transfert entre producteurs et consommateurs de matière organique au sein d'un territoire (cf. § II.3.1). Nos travaux ayant conduit au modèle d'action de l'agriculteur pour la gestion des matières organiques [Ca7] et à la typologie décrivant les exploitations types [Ca13] sont à la base du paramétrage des modèles MAGMA et BIOMAS et de la conception des scénarios de simulations testés avec eux.

Cette modélisation conceptuelle et le modèle MAGMA ont également été adaptés dans le contexte de la Bretagne qui présente de grandes similitudes avec des situations particulières d'élevage de la Réunion. Le paramétrage a été réalisé sur un jeu de données concernant un plan d'épandage collectif de lisier de porc. La généricité des concepts et de leur modélisation informatique a ainsi pu être mise à l'épreuve avec succès (cf. § II.3.3.).

II.2.2.3. Volatilisation de l'azote à l'épandage

Objet et finalités de recherche

Parmi les activités de gestion des matières organiques, l'épandage est l'opération la plus répandue dans les exploitations utilisant les effluents d'élevage bruts (le plus souvent) ou compostés. Cet épandage provoque une volatilisation d'ammoniac avec pour conséquences :

- des risques potentiels pour la santé humaine (Marcazzan *et al.*, 2001)⁹²,
- des risques de pollution, tels que l'acidification des sols et l'eutrophisation des eaux superficielles provoquées par les dépôts d'ammoniac (Apsimon *et al.*, 1987 ; Fangmeier *et al.*, 1994)⁹³,
- des pertes de nutriments pour les sols agricoles et un transfert de ces éléments vers des espaces naturels.

Si la volatilisation consécutive à l'épandage d'effluent d'élevage a été largement étudiée en condition tempérée (Moal *et al.*, 1995 ; Générumont, 1996 ; Misselbrook *et al.*, 2005)⁹⁴, il existait très peu de références en conditions tropicales, hormis quelques travaux sur la volatilisation d'ammoniac suite à l'épandage d'engrais minéraux, et aucune expérience n'avait été réalisée à la Réunion. L'extrapolation des connaissances acquises en Europe est très difficile, du fait des spécificités agronomiques et environnementales de la Réunion, telles que les pratiques (apport de lisier sur mulch de paille de canne à sucre, par exemple), les caractéristiques des sols (infiltrabilité, pH, CEC) et des climats (fortes variations climatiques dans le temps et dans l'espace). Pourtant, il est raisonnable d'attendre des émissions fortes, compte tenu des teneurs en azote ammoniacal élevées des effluents d'élevage, des modalités d'épandage par aspersion et des conditions climatiques favorables.

Ne pouvant couvrir toute la gamme des situations d'épandage, en collaboration avec Sophie Générumont et Dominique Flura (INRA, UMR EGC, Grignon) et Thierry Morvan (INRA, UMR SAS, Rennes), nous avons choisi d'étudier deux situations caractéristiques qui recouvrent une grande majorité des épandages réalisés à la Réunion :

- l'élevage bovin avec production et épandage de lisier sur prairies dans les Hauts de l'île de la Réunion ;
- l'élevage porcin avec production et épandage de lisier sur les surfaces cannières dans les Bas.

Ces deux situations contrastées nous ont permis de prendre en compte les paramètres liés au lisier (bovin, porcin), au sol (andosols meubles pour les prairies d'altitude, sols bruns ferralitiques drainant pour les surfaces cannières) et à sa couverture éventuelle (herbe pour la prairie, mulch de paille pour la canne à sucre), ainsi que les conditions climatiques (amplitude thermique très forte en altitude pour les prairies, chaleur et vents alizés pour la canne à sucre).

Intérêt scientifique

L'objectif principal était d'acquérir des données originales dans les diverses conditions agro-pédo-climatiques dans lesquelles les épandages d'effluents sont réalisés à la Réunion.

Cependant, utiliser ces données pour paramétrer des modèles prédictifs comme le modèle STAL (Morvan et Leterme, 2001)⁹⁵, ou améliorer et adapter puis, caler, des modèles plus mécanistes (Générumont et Cellier, 1997)⁹⁶, était un objectif à moyen terme. *In fine*, comme le mentionnait un des objectifs de l'ATP 99/60 dans laquelle s'insérait ces travaux (cf. § III.3.1.), on envisageait d'utiliser ces

⁹² MARCAZZAN G. M., VACCARO S., VALLI G., VECCHI R., 2001. Characterization of PM10 and PM2.5 particulate matter in the ambient air of Milan (Italy). *Atmospheric Environment* 35, 4639–4650.

⁹³ APSIMON H.M., KRUSE M., BELL J.N.B., 1987. Ammonia emissions and their role in acid deposition. *Atmospheric Environment* 21 (9), 1939–1946.

FANGMEIER A., HADWIGER-FANGMEIER A., VAN DER EERDEN L., JÄGER H.J., 1994. Effects of atmospheric ammonia on vegetation—A review. *Environmental Pollution* 86 (1), 43–82.

⁹⁴ MOAL J.F., MARTINEZ J., GUIZIOU F., COSTE C.M., 1995. Ammonia volatilization following surface-applied pig and cattle slurry in France. *Journal of Agricultural Science* 125, 245–252.

GÉNÉRMONT S., 1996. Modélisation de la volatilisation d'ammoniac après épandage de lisier sur parcelle agricole. Thèse de Doctorat, Université Paul Sabatier, Toulouse, 331 p.

MISSELBROOK T.H., NICHOLSON F.A., CHAMBERS B.J., 2005. Predicting ammonia losses following the application of livestock slurry to land, *Bioresource Technology* 96, 159–168.

⁹⁵ Modèle de simulation de la transformation de l'azote du lisier ; ce modèle a été développé par Thierry Morvan de l'UMR INRA Agrocampus Ouest SAS

MORVAN T., LETERME P. 2001. Vers une prévision opérationnelle des flux de N résultant de l'épandage de lisier: Paramétrage d'un modèle dynamique de simulation des transformations de l'azote des lisiers (STAL). *Ingénieries* 26, 17–26.

⁹⁶ GÉNÉRMONT S., CELLIER P., 1997. A mechanistic model for estimating ammonia volatilization from slurry applied to bare soil. *Agricultural and Forest Meteorology* 88(1/4), 145–167.

différents modèles ainsi paramétrés pour générer des références, des fonctions ou des modules « volatilisation » dans des modèles de gestion permettant d'évaluer différentes stratégies de gestion des matières organiques (cf. le modèle COMET, § II.3.3.),

Méthodologie

La volatilisation d'ammoniac a été suivie avec la méthode du bilan de masse (Fig. 10), la plus utilisée selon Misselbrook *et al.* (2005)⁹⁷, et qui assimile le flux d'ammoniac issu de la parcelle épandue (Φ_{NH_3} , en $\mu\text{g N-NH}_3 \text{ m}^{-3} \text{ s}^{-1}$) à un flux horizontal traversant, sous l'effet du vent, un plan vertical situé à une distance connue X du bord de la parcelle, autrement appelée fetch (Wilson and Shum, 1992, Ryden & McNeill, 1984)⁹⁸ :

$$\Phi_{NH_3} = \frac{1}{X} \int_{z_0}^{z_b} \overline{u(z)} \cdot (\overline{C_{NH_3}(z)} - C_{0NH_3}) \cdot dz \quad [1]$$

où z est la hauteur des points de mesure en m, u la vitesse horizontale du vent en m s^{-1} , C_{NH_3} la concentration en ammoniac en $\mu\text{g m}^{-3}$ mesurée à la hauteur z , C_{0NH_3} la concentration ambiante en ammoniac en $\mu\text{g m}^{-3}$ mesurée en un point situé au vent de la parcelle ou au dessus de la couche limite, z_0 la longueur de rugosité de la parcelle en m, et z_b la hauteur de la couche limite en m.

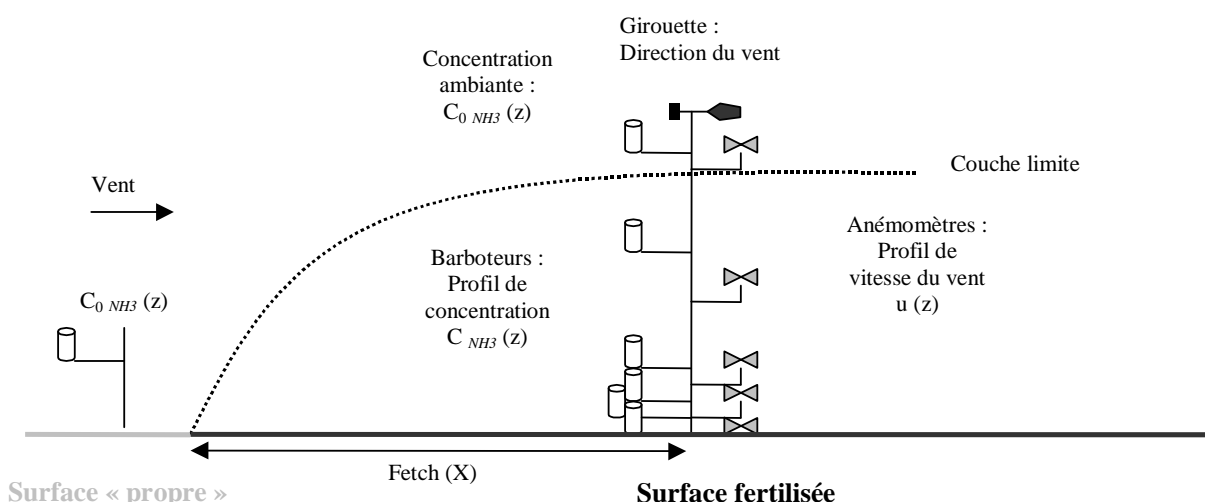


Figure 10. Principe et dispositif de la méthode de mesure de flux d'ammoniac par bilan de masse [Ca10].

Les profils de vent et de concentration sont habituellement ajustés par des fonctions logarithmiques de la hauteur au-dessus de la surface du sol (Ryden et McNeill, 2004, *op. cit.*). Cependant, pour le profil de concentration, un polynôme quadratique du logarithme népérien de la hauteur permet un meilleur ajustement que la fonction logarithmique simple, soit :

$$\overline{u(z)} = A \cdot \ln(z) + B \quad [2]$$

$$\overline{C_{NH_3}(z)} - C_{0NH_3} = C \cdot \ln^2(z) + D \cdot \ln(z) + E \quad [3]$$

où A, B, C, D et E sont les paramètres à calculer par ajustement aux mesures.

Les mesures ont été effectuées à différentes hauteurs sur le mât (Fig. 10). La vitesse de vent a été mesurée en continu avec des anémomètres à coupoles. La concentration en ammoniac a été mesurée par piégeage dynamique de l'ammoniac dans 50 mL d'une solution d'acide sulfurique 0,072N. Le débit

⁹⁷ MISSELBROOK T.H., NICHOLSON F.A., CHAMBERS B.J., JOHNSON R.A., 2005. Measuring ammonia emissions from land applied manure: an intercomparison of commonly used samplers and techniques. *Environmental Pollution* 135(3), 389-397.

⁹⁸ WILSON J.D., SHUM W.K.N., 1992. A re-examination of the integrated horizontal flux method for estimating volatilization from circular plots. *Agricultural Forest and Meteorology* 57, 281-295.

RYDEN J.C., MCNEILL J.E., 1984. Application of the micrometeorological mass balance method to the determination of ammonia loss from a grazed sward. *Journal of the Science of Food and Agriculture* 35, 1297-1310.

d'air dans la solution (environ 3,5 L/min) a été mesuré avec un débit-mètre et la concentration en ions ammonium a été déterminée ultérieurement en laboratoire avec un analyseur en colorimétrie à flux continu.

Simultanément, des mesures d'infiltration dans le sol et de rétention sur le fourrage ou dans le mulch ont été réalisées sur des placettes. Le lisier y a été apporté manuellement à une dose identique à celle de la parcelle utilisée pour le bilan de masse [Ca10].

Principaux résultats

Les résultats obtenus dans ces expérimentations mettent en évidence des flux de volatilisation très forts immédiatement après l'apport, diminuant très rapidement ensuite, et se stabilisant à un niveau très faible un à quelques jours seulement après l'apport. Ils montrent que le comportement des prairies d'altitude n'est pas très différent de ce que l'on peut observer en climat tempéré dans des conditions semblables. En effet, les pertes ont eu lieu dans les tout premiers jours après l'apport [Ca10]. Le couvert prairial a joué un rôle important sur le déterminisme de la volatilisation d'ammoniac après épandage du fait de ses capacités de rétention du lisier et de l'azote ammoniacal : 57% du lisier riche en MS (8,2%) a été retenu par la végétation. Cependant, ces pertes (de l'ordre de 40% de l'azote ammoniacal apporté) ont été plutôt inférieures aux émissions observées en Europe (Stevens et Logan, 1987 ; Thompson *et al.*, 1990 ; Bussink *et al.*, 1994; Frost, 1994)⁹⁹, vraisemblablement en raison d'une température moyenne faible observée dans cet essai réalisé durant l'hiver austral en altitude (1500 m) : 9°C en moyenne à la surface du sol.

Les résultats sur canne à sucre sont, quant à eux, très originaux [Ai14]. S'ils montrent une homogénéité des émissions pour les 2 essais, réalisés respectivement en août 2000 et octobre 2001, sur sol nu, les cinétiques cumulées d'émission d'ammoniac sont très variables entre les deux essais en ce qui concerne l'épandage sur mulch : en 2000, seulement 10% de l'azote ammoniacal a été volatilisé, alors qu'en 2001, sous des conditions climatiques favorables (température, vent, faibles pluies), les émissions ont conduit à la perte de la quasi-totalité de l'azote ammoniacal du lisier, ce qui réduit fortement l'intérêt agronomique et environnemental de cette pratique.

Sur sol nu, la cinétique d'émission cumulée a montré une émission extrêmement rapide après l'épandage, par rapport aux cinétiques observées en conditions tempérées. Pour limiter ces pertes, l'enfouissement du lisier doit donc être réalisé simultanément ou juste après l'épandage. Peu de différence a été constatée entre les essais 2000 et 2001 pour les cinétiques instantanée et cumulée, malgré des conditions assez différentes concernant le lisier utilisé (teneur en MS plus élevée en 2001) et le climat (plus chaud en 2001). Les quantités d'ammonium apportées étaient cependant identiques et les faibles pluies enregistrées, pour ces deux essais, le lendemain de l'épandage ont pu favoriser l'infiltration du lisier et compenser les températures plus élevées. Cette infiltration dans le sol permet la fixation plus ou moins irréversible de l'azote ammoniacal par le complexe argilo-humique et son entrée dans les biotransformations telles que la nitrification, l'immobilisation ...

Concernant l'épandage sur le mulch de paille de canne à sucre, les résultats montrent soit un abattement important de la volatilisation en 2000 par rapport au sol nu, soit, au contraire, une forte augmentation de la volatilisation en 2001. Dans le premier cas, on peut penser que le lisier moins riche en MS a été lessivé sous le mulch, notamment sous l'effet d'une pluie intervenue le lendemain de l'épandage. Dans le second cas, les faibles pluies n'ont pas permis le lessivage complet du lisier plus riche en MS ; au contraire, le maintien du lisier dans le mulch humide et les températures plus élevées lors de cet essai ont favorisé la volatilisation [Ai14]. La rétention du lisier dans le mulch crée des conditions très favorables car la surface d'échange avec l'atmosphère est décuplée [Tm10]. Ainsi, pour limiter les pertes lors d'épandage sur mulch de paille de canne, cas le plus fréquent, on pourrait préconiser :

⁹⁹ STEVENS R.J., LOGAN H.J., 1987. Determination of the volatilization of ammonia from surface-applied cattle slurry by the micrometeorological mass balance method. *Journal of Agricultural Science*, 109:205-207.
THOMPSON R.B., PAIN B.F., LOCKYER D.R., 1990. Ammonia volatilization from cattle slurry following surface application to grassland. I. Influence of mechanical separation, changes in chemical composition during volatilization and the presence of the grass sward. *Plant and Soil*, 125:109-117.
BUSSINK D.W., HUIJSMANS J.F.M., KETELAARS J.J.M.H., 1994. Ammonia volatilization from nitric acid-treated cattle slurry surface applied to grassland. *Netherlands Journal of Agricultural Science*, 42:293-309.
FROST J.P., 1994. Effect of spreading method, application rate and dilution on ammonia volatilization from cattle slurry. *Grass and Forage Science*, 49:391-400.

1. de choisir des périodes de faibles températures avec peu de vent, des pluies suffisantes (ou une irrigation) juste après l'apport de lisier,
2. d'apporter des lisiers suffisamment dilués, ce qui peut cependant poser des difficultés accrues de transport,
3. d'injecter le lisier sous le mulch, ce qui nécessiterait la mise au point d'un matériel spécifique en raison de l'épaisseur du mulch ou d'un itinéraire simplifié : andainage de la paille, suivi de l'épandage du lisier avec une rampe à pendillards ou multibuses puis le recouvrement du lisier par la paille.

Cependant, des études plus exhaustives portant sur le devenir de l'azote du lisier devraient être conduites afin d'éviter le transfert de pollution entre différentes formes de l'azote (ammoniac vs nitrate ou protoxyde d'azote) ou entre compartiments de l'environnement (air vs eau).

Regard critique

Pour affiner ou confirmer certains résultats, des expérimentations en incubation ou en cellules de mesure, seraient à favoriser par rapport aux mesures de terrain en focalisant les recherches sur le rôle du sol et du lisier pour ce qui est de l'infiltration, de l'adsorption et du pH, en relation avec les biotransformations. Il serait aussi nécessaire d'étudier, parallèlement à la volatilisation d'ammoniac, les autres processus impliquant l'azote ammoniacal dans le sol, pour mieux comprendre les différences observées entre un sol nu et un sol recouvert de mulch.

La démarche de modélisation initialement envisagée a seulement été ébauchée pour ce qui concerne le sol nu : 1) en confrontant les données aux résultats du modèle STAL (Morvan et Leterme, 2001, *op. cit.*), 2) plus récemment (article en préparation [Ai19]) en testant le modèle VOLT'AIR¹⁰⁰ paramétré avec les données de la Réunion (climat, sol). Une seconde étape, non réalisée à ce jour, consisterait à intégrer la présence du couvert prairial et de mulch de résidus de culture dans ces modèles. Cela pourrait se faire de deux manières, soit en les intégrant explicitement dans des modèles mécanistes (Générmont et Cellier, 1997, *op. cit.*), avec toutes les difficultés de description que cela peut représenter (effet sur le microclimat, potentiel de rétention en eau du mulch, fonction de puits ou de source d'azote ammoniacal par le couvert prairial ...) soit, en calant des modèles plus opérationnels, tels que STAL, avec de nouvelles fonctions semi-empiriques. Ces deux approches sont complémentaires.

Après une étape de validation, les résultats des simulations de ces modèles biophysiques (classes de valeurs) ou certaines fonctions essentielles décrivant la volatilisation pourraient être intégrés dans les modèles de gestion tels que MAGMA (Guerrin, 2001, *op. cit.*) qui simule l'épandage de matières organiques au niveau d'une exploitation. Cette intégration permettrait de comparer différentes stratégies de gestion sur les plans agronomique (besoin des plantes) et environnemental (émissions gazeuses), en intégrant ces pertes. Récemment, le modèle de gestion de flux COMET [Ci28, Ci31] simulant un plan d'épandage collectif, qui inclut le modèle STAL paramétré dans les conditions de la Bretagne sur sol nu, a été réalisé (cf. § II.3.3.). Son adaptation aux conditions tropicales et aux sols couverts resterait cependant à faire.

II.2.2.4. Transformations hors-sol des effluents : émissions gazeuses lors du compostage

Objet et finalités de recherche

A travers l'analyse des pratiques décrite précédemment (cf. § II.2.2.2.), nous avons mis en évidence la nécessité d'une adéquation entre le type d'effluent et le type de culture [Ai4]. La mise en œuvre du compostage des effluents d'élevage est une technique de plus en plus envisagée par les agriculteurs comme solution pour mieux gérer les effluents sur l'exploitation, car cette simple transformation biologique des MO est intéressante pour réaliser cette adéquation dans le temps et l'espace. Le compostage présente, en effet, des avantages sur les plans techniques (facilité de gestion d'un produit solide, désodorisé, moins pondéreux que les effluents initiaux, possibilité d'épandre à proximité d'habitations et de cours d'eau) et agronomiques (amélioration des qualités physiques et biologiques du sol, apport progressif d'éléments nutritifs aux plantes, limitation des effets toxiques sur les plantes).

¹⁰⁰ Modèle simulant la volatilisation de l'ammoniac après apport d'azote sur les cultures ; ce modèle a été développé par Sophie Générmont et Pierre Cellier de l'UMR INRA Agro-Paris-Tech EGC (Générmont et Cellier, 1997, *op. cit.*)

Durant ce processus, beaucoup d'eau est émise sous forme de vapeur et parfois plus de 50% de la MO initiale sont perdus sous forme gazeuse, principalement du CO₂ (Martins and Dewes, 1992 ; Kuroda *et al.*, 1996 ; Hellebrand, 1998)¹⁰¹. Selon les conditions, d'autres gaz nocifs pour l'environnement sont également volatilisés, notamment l'ammoniac responsable de l'acidification des pluies et de l'environnement et de la formation d'aérosols (Apsimon *et al.*, 1987, *op. cit.* ; Fangmeier *et al.*, 1994, *op. cit.*), le protoxyde d'azote et le méthane qui sont des gaz à effet de serre (Houghton *et al.*, 2001)¹⁰². Ainsi, la finalité de ces recherches est de réaliser le bilan environnemental du procédé de compostage pour une large diversité d'effluents d'élevage. Au-delà de l'impact environnemental du procédé, il s'agit aussi de comprendre et modéliser la transformation des MO pour mieux prédire la composition des composts et leur utilisation.

Intérêt scientifique

L'intérêt scientifique concerne deux points principaux :

- la compréhension et la prédiction des effets des principaux facteurs de contrôle des processus de transformation [Ai3, Ai6, Ai16, Ci36] : carbone biodégradable, disponibilité de l'azote, densité et humidité, sur les émissions d'ammoniac, de dioxyde de carbone et d'eau durant le compostage,
- l'acquisition de références sur les émissions gazeuses lors du compostage (NH₃, N₂O, CO₂, CH₄, H₂O), et sur l'évolution (i) des formes d'azote et de carbone et (ii) des teneurs en composés non volatils potentiellement polluants (P, ETM) dans le produit composté [Rr21].

Méthodologie

En collaboration avec Paul Robin et Mélynda Hassouna (INRA, UMR SAS, Rennes), dans le cadre du programme Porcherie Verte (action 42c) [Ci19, Ci20], nous avons élaboré un plan d'expérience pour étudier les quatre facteurs précédemment cités. Quatre expérimentations ont été conduites successivement dans une halle expérimentale qui comprend quatre cellules isolées dans une atmosphère contrôlée [Rr17, Rr18, Rr21, Tt2]. Ce dispositif permet de mesurer en continu les émissions de gaz (NH₃, N₂O, CO₂, CH₄, H₂O). Dans chacune des cellules, un tas de compost est réalisé [Ai3]. Quinze tas de compositions très contrastées ont ainsi été mis à composter [article soumis Ai16, Ci36]. Des prélèvements ont été effectués sur les matériaux mis à composter et sur le compost (durée de compostage allant de 36 à 60 j) pour déterminer les teneurs en MS, MO, C, N, P, K, Cu et Zn et calculer les pertes massiques. Le fractionnement Van Soest (1963)¹⁰³ a été utilisé pour caractériser la biodégradabilité de la MS et l'azote soluble selon Dulphy et Demarquilly (1981)¹⁰⁴ pour la disponibilité de l'azote.

Les données des cinétiques d'émissions cumulées de NH₃ (eq. 4) ont été ajustées avec le modèle de Kirchmann and Witter (1989)¹⁰⁵ et celles de H₂O et CO₂ (eq. 5) ont été ajustées avec le modèle de Bernal and Kirchmann (1992)¹⁰⁶ :

$$M = M_0 C_R (1 - e^{-k_R t}) + M_0 C_S (1 - e^{-k_S t}) \quad [4]$$

$$M = M_0 C_R (1 - e^{-k_R t}) + M_0 C_S k_S t \quad [5]$$

¹⁰¹ MARTINS O., DEWEES, T., 1992. Loss of nitrogenous compounds during composting of animal wastes. *Bioresource Technology* 42 (1), 103-111.

KURODA K., TAKASHI O., MITIHIRO Y., AKANE K., TAKAKO N., SIGENORI M., TOMOKO K., 1996. Emissions of malodorous compounds and greenhouse gases from composting swine feces. *Bioresource Technology* 56, 265-271.

HELLEBRAND H.J., 1998. Emission of nitrous oxide and other trace gases during composting of grass and green waste. *Journal of Agricultural Engineering Research*, Vol. 69, N° 4, 365-375.

¹⁰² HOUGHTON, J.T., DING, Y., GRIGGS, D.J., NOGUER, M., VAN DER LINDEN, P.J., DAI, X., MASKELL, K., JOHNSON, C.A., 2001. Climate change 2001: the scientific basis. Report of the IPCC working group I, 96 p.

¹⁰³ VAN SOEST, P.J., 1963. Use of detergents in the analysis of fibrous feeds. II – A rapid method for the determination of fibre and lignin. *J. Assoc. off. Anal. Chem.* 46, 829-835.

¹⁰⁴ DULPHY, J.P., DEMARQUILLY, C., 1981. Problèmes particuliers aux ensilages. In : *Prévision de la valeur nutritive des aliments des ruminants*, (Ed.) INRA publications, Versailles, pp. 81-104.

¹⁰⁵ KIRCHMANN H., WITTER E., 1989. Ammonia volatilization during aerobic and anaerobic manure decomposition. *Plant and Soil* 115 (1), 35-41.

¹⁰⁶ BERNAL M.P., KIRCHMANN H., 1992. Carbon and nitrogen mineralization and ammonia volatilization from fresh, aerobically and anaerobically treated pig manure during incubation with soil. *Biology and Fertility of Soils*, 13 (3), 135-141.

avec $C_S = 1 - C_R$, où M est l'émission cumulée de N-NH₃, C-CO₂ ou H₂O (g kg⁻¹ masse initiale), M_0C_R est la fraction rapidement émise (g kg⁻¹ masse initiale), M_0C_S est la fraction lentement émise (g kg⁻¹ masse initiale), k_R et k_S sont les coefficients de vitesse correspondant (j⁻¹), et t est le temps (j).

Les données des cinétiques instantanées ont été ajustées à un modèle log-normal (eq. 6) :

$$I = I_0 + ae^{-0.5 \left(\frac{\ln \frac{t}{t_0}}{b} \right)^2} \quad [6]$$

où I est l'émission instantanée de N-NH₃, C-CO₂ ou H₂O (g kg⁻¹ masse initiale h⁻¹), I_0 est l'émission résiduelle (g kg⁻¹ masse initiale h⁻¹) après la décroissance du pic d'émission, $a+I_0$ est l'émission maximale (g kg⁻¹ masse initiale h⁻¹) atteinte à t_0 (j), t est le temps (j), b caractérise la décroissance de l'émission après l'atteinte du maximum (sans dimension).

Ainsi, pour chaque émission, 8 paramètres caractérisent les courbes d'émissions cumulées et instantanées : M_0C_R , M_0C_S , k_R , k_S , I_0 , a , t_0 , b . Des modèles statistiques (régression multiple et analyse de variance) ont été construits en prenant comme variables explicatives les compositions biochimique et physique des tas. Ces modèles statistiques ont ensuite été utilisés sur des tas hypothétiques pour étudier l'influence des facteurs sur les émissions [Ci36].

De plus, deux expérimentations en vraie grandeur, permettant de valider les équations établies à partir des données obtenues dans le dispositif contrôlé, ont été menées en utilisant la méthode de traçage avec l'hexafluorure de soufre (SF₆) (Robin *et al.*, 2004)¹⁰⁷ pour calculer les débits d'air et les émissions gazeuses. Des bilans d'éléments ont également été réalisés sur ces tas.

Principaux résultats

Les modèles statistiques estiment assez correctement les émissions cumulées, dans une gamme de 171 à 776 g H₂O kg⁻¹ H₂O initial, de 191 à 614 g C-CO₂ kg⁻¹ C total initial et de 93 à 483 g N-NH₃ kg⁻¹ N total initial [Ai16]. Les pics d'émissions instantanées sont assez souvent sous-estimés, notamment pour l'émission ammoniacale. Cependant, celle-ci reste dans le bon ordre de grandeur ($\pm 20\%$) permettant une bonne représentation des tas mis à composter et l'étude de l'influence des facteurs principaux de conduite du procédé sur les émissions [Ci36].

La création d'une première situation hypothétique, correspondant aux caractéristiques moyennes des tas relativement à la biodégradabilité du carbone et à la disponibilité de l'azote, nous a permis de montrer l'influence de la densité et de l'humidité. L'émission de H₂O n'est pas influencée par l'humidité mais est réduite de 40% lorsque la densité de la matière sèche augmente de 0,1 à 0,3 t m⁻³. La convection dans le tas est réduite avec une forte densité de matière sèche d'où une plus faible émission d'eau ; la production d'eau métabolique est également réduite du fait de la diminution de l'activité des microorganismes. *A contrario*, l'émission de C-CO₂ est très dépendante de l'humidité, elle décroît de 700 à 250 g kg⁻¹ C total initial lorsque la teneur en MS augmente de 20 à 60%, la densité ayant un effet plus limité. Une teneur en MS élevée réduit la croissance de la biomasse microbienne dans le tas, d'où une réduction forte du carbone émis [Ai6]. L'humidité et la densité influencent conjointement et fortement l'émission ammoniacale : pour une densité de MS faible de 0,1 t m⁻³, l'émission de N-NH₃ est élevée (290 g kg⁻¹ N total initial) avec un maximum vers 25 à 30% de MS ; pour une densité moyenne de 0,15 t m⁻³, l'émission de N-NH₃ est divisée par 3 et le maximum se situe vers 35% de MS ; aucun effet de la teneur en MS n'est constaté pour une densité très élevée de 0,3 t m⁻³ avec une émission réduite à 50 g kg⁻¹ N total initial. La porosité détermine fortement la convection dans le tas et en conséquence la volatilisation d'ammoniac. Avec une densité de matière sèche élevée, la porosité est faible de même que pour une humidité élevée, ce qui réduit fortement l'émission ammoniacale dans les deux cas [Ai6]. Dans le cas d'une humidité très faible et malgré une faible densité de MS, c'est l'activité réduite de la biomasse microbienne qui diminue l'élévation de température et en conséquence la volatilisation d'ammoniac.

¹⁰⁷ ROBIN P., HASSOUNA M., RAMONET Y., TEXIER C., 2004. Maîtrise des émissions gazeuses en bâtiments sur litière (validation en élevages des résultats acquis en conditions climatiques contrôlées). Rapport Final, convention MAAPAR / INRA, action de recherche 41b Porcherie verte, 106 p.

Une seconde situation hypothétique correspondant à des caractéristiques moyennes d'humidité (69%) et de densité ($0,15 \text{ t m}^{-3}$) des tas permet de montrer l'influence de la biodégradabilité du carbone et de la disponibilité de l'azote [Ai3]. Pour une biodégradabilité moyenne du carbone, mesurée par la fraction soluble van Soest ($S_{vs}:DM = 400 \text{ g kg}^{-1}$), la disponibilité de l'azote a peu d'influence jusqu'à ce que la valeur de $SN:TN$ (N soluble/N total) de 60% soit atteinte. Au-delà, l'émission de $C-CO_2$ décroît rapidement et celle de $N-NH_3$ augmente. Pour une disponibilité moyenne de l'azote ($SN:TN = 60\%$), la biodégradabilité du carbone a une influence très forte sur l'émission de $N-NH_3$ qui décroît de 75% lorsque que $S_{vs}:DM$ augmente de 200 à 550 g kg^{-1} C total initial. L'immobilisation de l'azote par la biomasse microbienne est l'hypothèse majeure avancée pour expliquer la réduction de l'émission ammoniacale lorsque le carbone des matériaux mis à composter est plus biodégradable [Ai3].

Au-delà de ces deux situations spécifiques, les simulations avec ces modèles de régression linéaire permettent d'estimer les pertes et les émissions vers l'environnement : la densité de MS et l'humidité sont deux facteurs prépondérants qu'il est alors nécessaire de connaître au mieux par des mesures de masse et volume des tas et des prélèvements représentatifs [Ci36]. Ils permettent aussi de donner des premières indications pour réduire les pertes au compostage. A titre d'exemple, une réduction de l'aération en tassant ou en ajoutant de l'eau peut réduire les émissions de NH_3 et N_2O de plus de 50%, l'effet du tassement étant supérieur lorsque le fumier est sec [Ai6, Tt2].

La modélisation statistique décrite précédemment concerne le compostage classique réalisé majoritairement en aérobiose. Un autre procédé visant l'imprégnation-compostage de lisier sur paille, technique en développement dans les petites structures d'élevage pour traiter par élimination l'azote excédentaire, a également été étudié pour en réaliser le bilan environnemental. Les émissions ont été mesurées, en vraie grandeur (système Guernévez®), durant 180 jours [Rr21, Ci19] : 65% du carbone est émis, dont 57% sous forme de CO_2 , 6% sous forme de méthane et 2% sous forme de composés organiques volatils (estimation) ; 60% de l'azote est émis, dont 6% sous forme de N_2O , 10% sous forme de NH_3 et 44% sous forme de N_2 . Dans ce type de compostage avec une faible élévation de température ($< 45^\circ C$), consécutive à la faible quantité de paille relativement au lisier apporté et la faible hauteur de la couche en compostage ($< 0,5 \text{ m}$), la nitrification et la dénitrification, ainsi que l'organisation de l'azote par la biomasse microbienne sont des processus majeurs [Rr21]. En effet, deux couches se différencient, une aérée permettant la nitrification et une anoxique permettant la dénitrification, ces processus étant contrôlés par la disponibilité de carbone biodégradable. Si l'émission d'ammoniac est réduite par rapport au procédé classique de compostage en aérobiose, les émissions de gaz à effet de serre (N_2O et CH_4) sont très importantes, grevant alors l'impact environnemental global des ateliers porcins utilisant cette technique pour résoudre les excédents d'azote [Ai12, Tt5]. De plus, l'élimination d'eau et la forte dégradation de la MO conduisent à des concentrations élevées en phosphore, cuivre et zinc dans le produit composté [Rr21].

Regard critique

L'ensemble de ces travaux sur le compostage ont été initiés dans le cadre du programme Porcherie Verte (financement ADEME et INRA) et ont fait l'objet de plusieurs communications [Ci19, Ci20, Ci36] et de publications [Ai3, Ai6, Ai7, Ai9, Ai10, Ai16 en cours]. Après une phase d'analyse statistique des données (modèles de régression linéaire) et de valorisation (contribution à des thèses et publications), le travail de modélisation est entré récemment dans une seconde phase avec la mise en route fin 2009 de la thèse de Didier Oudart, financée par un industriel de l'aviiculture de la Réunion (Crête d'Or Entreprise) dans le cadre d'une convention CIFRE. L'objectif de la thèse est de vérifier que les facteurs C biodégradable, N disponible, densité et humidité permettent de prédire simultanément les principales émissions gazeuses et la stabilisation des composés organiques lors du compostage. Un recours à la modélisation dynamique des principaux processus biochimiques et physiques du compostage a donc été envisagé, à partir des modèles déjà publiés dans la littérature et en utilisant les données acquises préalablement en conditions contrôlées. Une expérimentation de validation a été réalisée fin 2010 dans la halle expérimentale de l'UMR SAS à Rennes, permettant de vérifier la précision du dispositif de mesures des émissions gazeuses et d'évaluer l'effet du retournement en conditions contrôlées. Ces mesures viennent compléter le jeu de données existant sur les 15 tas ayant servi à l'élaboration des modèles statistiques. La validation de ce modèle dynamique est prévue par une expérimentation sur site industriel à la Réunion en 2011.

Après ces validations, l'utilisation du modèle dynamique est envisagée pour aider au choix de conduite du procédé de compostage en situation commerciale. On se propose également d'utiliser les données

expérimentales et le modèle dynamique pour raisonner les transformations de déchets dans différentes situations de recyclage agronomique étudiées dans le projet ISARD.

D'ores et déjà, les données expérimentales acquises depuis 2001 ont été utilisées pour calculer des facteurs d'émissions au compostage. Afin de quantifier les flux gazeux vers l'atmosphère au sein d'exploitations utilisant la technique du compostage, ces facteurs d'émissions et les règles décrivant les situations de compostage ont été inclus dans le module « bâtiment-stockage-traitement » du modèle MELODIE [Tt5] et dans le module « stockage et transformation des effluents » du modèle GAMEDE [Tt3] (cf. § II.3.2.).

II.3. Modélisation de la gestion des flux de matières aux niveaux de l'exploitation d'élevage et du territoire et évaluation environnementale

II.3.1. Modèles de simulation de la gestion des effluents d'élevage

L'Action Thématique Programmée (ATP) 99/60 du CIRAD a réuni, durant 3 ans, des chercheurs du CIRAD, de l'INRA et de l'université de la Réunion (agronomes, technologues, économistes, modélisateurs, informaticiens). Ce travail pluridisciplinaire a permis des avancées méthodologiques concernant la représentation et la modélisation de systèmes complexes et a fait l'objet d'un séminaire de restitution en 2002 avec l'édition d'un ouvrage sous forme de cédérom [O2]. Des publications ont également été produites [Ai2, Ai4, Ci10, Ci11, Ci16] (Guerrin, 2001, *op. cit.* ; Guerrin et Ranaivosolo, 2001 ; Hélias *et al.*, 2001 ; Guerrin, 2004)¹⁰⁸. Une thèse, initiée à partir de cette ATP a été soutenue [Tt1].

En tant qu'initiateur et coordinateur, avec François Guerrin, j'ai participé à la plupart des travaux. Cependant, mes recherches ont plus spécifiquement concerné :

1. l'analyse des pratiques et la définition des cas types servant de base de simulation (cf. § II.2.2.1.),
2. le modèle d'action servant de cadre d'implémentation des variables et règles de gestion (cf. § II.2.2.2.),
3. la représentation conceptuelle des modèles MAGMA et BIOMAS décrite succinctement ci-après,
4. la définition de stratégies de gestion, de scénarios de simulation et d'indicateurs,
5. l'utilisation du modèle MAGMA sur un cas type avec évaluation des stratégies simulées [Ca14].

La démarche de modélisation, initiée par cette ATP a donc constitué le premier cadre d'intégration des connaissances multiples issues des recherches systémiques centrées sur les pratiques des éleveurs en matière de gestion des effluents. De plus, certaines pratiques déterminantes pour la gestion des flux de polluants ont motivé la mise en place de recherches analytiques. Ainsi, j'ai également encadré des travaux pour l'acquisition de connaissances sur les systèmes biophysiques : étude de la volatilisation de NH₃ après épandage de lisier (cf. § II.2.2.3.) [Tm13], étude des biotransformations de N et C des MO apportées au sol [Tm11, Tm12], construction des feuilles de calcul MACSIZUT (tableur) évaluant les procédés de traitement du lisier (Le Mesre de Pas, 2001)¹⁰⁹, ébauche de travaux sur la transformation hors sol des effluents d'élevage [Tm10]. Les résultats de ces recherches analytiques n'ont pas été pris en compte dans la modélisation de la gestion des effluents d'élevage à ce stade du projet d'ATP. En effet, l'intégration de processus biophysiques a été ébauchée plus tardivement dans le cadre du projet SPA/DD, avec la réalisation du modèle COMET concernant la gestion collective de lisier de porcs en Bretagne (cf. § II.3.3.) et des modèles GAMEDE à la Réunion et MELODIE en Bretagne simulant la gestion des activités dans les exploitations laitières et/ou porcines (cf. § II.3.2.).

¹⁰⁸ GUERRIN F., RANAIVOSOLO P.W., 2001. Managing the supply of a slurry treatment plant by means of a hybrid dynamical system. 2nd IFAC-CIGR Workshop on Intelligent Control For Agricultural Applications, Bali (Indonesia), August 22-24, p. 134-139.
HÉLIAS A., GUERRIN F., LOPEZ P., STEYER J.P., 2001. Simulating management policies on stock supplied by multiple production units: application to a pig slurry treatment plant. Efitra 2001, 3rd Conf. of the European Federation for Information Technology in Agriculture, Food and Environment, Montpellier (F), June 18-21, paper # 103, 6 p.
GUERRIN F., 2004. Simulation of stock control policies in a two-stage production system. Application to pig slurry management involving multiple farms. Computers and Electronics in Agriculture, 45(1-3): 27-50.

¹⁰⁹ LE MESRE DE PAS D., 2001. Modélisation des procédés de traitement des effluents d'élevage en vue de leur évaluation. Rapport de stage de 2^{ème} année, ENSAM, CIRAD, Montpellier, 54 p.

Objet et finalités de recherche

A la Réunion, on constate d'une part des excédents de MO produits par les élevages, mal valorisés et générateurs de nuisances, et d'autre part des besoins en fertilisation organique non satisfaits, dans les systèmes maraîchers notamment. Des transferts de MO sont donc nécessaires pour rééquilibrer les systèmes (Fig. 11). Des moyens de gestion efficaces et durables permettant d'adapter, en quantité et en qualité, « l'offre » d'effluents des élevages à la « demande » en MO des cultures sont donc à rechercher. Les recherches entreprises dans cette ATP avaient donc comme finalité d'évaluer différentes stratégies de gestion des MO, afin d'améliorer les pratiques ou de proposer des alternatives.

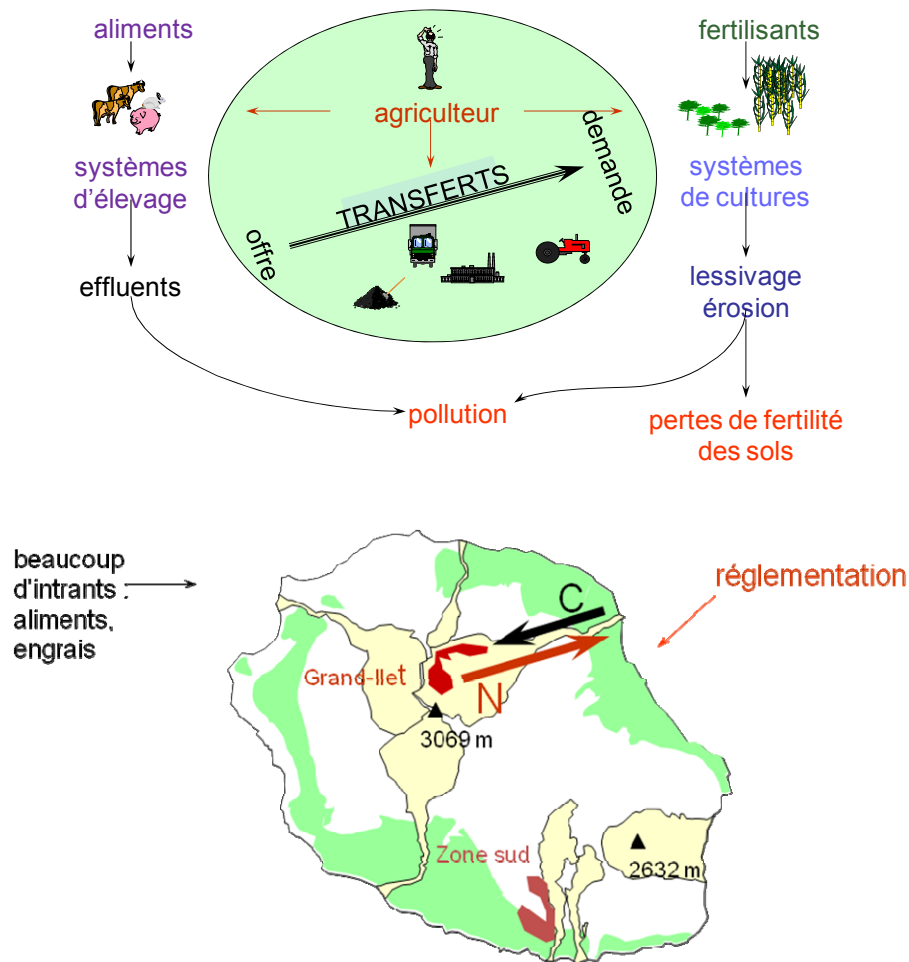


Figure 11. Schématisation de la problématique des transferts de MO vue au niveau de l'exploitation agricole (schéma du haut) ou du territoire de la Réunion (schéma du bas) (source : Guerrin et Paillat, 1998, document de présentation de l'ATP 99/60, non publié).

L'objectif des recherches a consisté au développement de modèles de simulation, construits à partir de l'analyse des pratiques et de références agronomiques, et conçus dans la perspective de leur utilisation pour l'aide à la gestion des systèmes de production et l'évaluation des risques environnementaux relatifs à différentes stratégies de gestion des MO [Ci16].

Intérêt scientifique

La construction des modèles de gestion a servi plusieurs intérêts pour les recherches en mathématiques et informatique appliquées et en agronomie que je résume ainsi :

- mise en œuvre de différents formalismes de modélisation (systèmes multi-agents, systèmes dynamiques hybrides),

- intégration ou couplage de modèles distincts,
- construction d'indicateurs permettant de comparer différentes stratégies de gestion dans l'optique de l'évaluation agronomique et environnementale des systèmes de production,
- élaboration d'outils de simulation permettant l'accompagnement de la recherche, la conception et le test de stratégies de gestion susceptibles de déboucher sur l'aide à la décision et le conseil,
- analyse, à l'échelle de territoires, de la gestion des effluents d'élevage et étude des interactions entre niveaux d'organisation individuel et collectif,
- représentation d'interactions entre processus de gestion et processus biophysiques.

Méthodologie

L'analyse des pratiques et la formalisation du modèle d'action des agriculteurs (§ II.2.2.1. et II.2.2.2.) nous ont amenés à considérer la modélisation des systèmes de production à deux niveaux de gestion (Fig. 11) :

- l'exploitation agricole (niveau individuel) où il y a lieu de mieux organiser les transferts de MO des ateliers d'élevage vers les cultures,
- le territoire (niveau collectif), où il y a lieu de mieux organiser les transferts de MO des exploitations excédentaires vers les exploitations déficitaires ou l'approvisionnement d'unités de traitement.

A ces deux niveaux, l'adaptation qualitative des MO produites par les élevages aux besoins des systèmes de culture, et la flexibilité accrue de la gestion temporelle et spatiale des effluents, sont rendues possible par leur transformation en produits plus élaborés (compost, par exemple).

Le principal travail méthodologique de l'ATP a consisté dans la réalisation de modèles dynamiques de simulation, aux deux niveaux de gestion considérés, en utilisant deux formalismes différents : les systèmes dynamiques hybrides (SDH) et les systèmes multi-agents (SMA). L'utilisation des modèles en situation de gestion avec les acteurs agricoles (agriculteurs, techniciens, décideurs des filières ou publics) n'a été qu'ébauchée au cours de l'ATP (Viard, 2000)¹¹⁰ ; elle s'est poursuivie avec la thèse de J.-M. Médoc initiée en 2004 et interrompue en 2008 (cf. § I.1.2., note 22) et a été mise en œuvre de façon plus complète en Bretagne en 2009-2010 avec le modèle COMET (cf. § II.3.3.).

Principaux résultats

Plusieurs modèles mathématiques et informatiques ont été réalisés [Ci16, Ca11]. Certains de ces travaux, bien qu'initiés dans le cadre de l'ATP 99/60 ont été poursuivis les années suivantes dans le cadre d'autres projets tels que Porcherie Verte (Action 54d)¹¹¹ et SPA/DD. Ces modèles, développés depuis une dizaine d'années, permettent de simuler une grande diversité de cas relatifs à :

1. la gestion des flux d'effluents d'élevage au niveau de l'exploitation agricole avec le modèle MAGMA (Guerrin, 2001, *op. cit.*),
2. la gestion des flux d'effluents entre exploitations distinctes avec les modèles BIOMAS [Ai2, Ci18, Ca8, Tm19], et MENS, ce dernier donnant, par couplage avec MAGMA, le système MAGMAS (Martin *et al.*, 2001)¹¹²,
3. la gestion collective de l'approvisionnement d'unités de traitement avec les modèles APPROZUT I (Guerrin et Ranaivosolo, 2001, *op. cit.* ; Guerrin, 2004, *op. cit.* ; Guerrin et Médoc, 2005)¹¹³ et APPROZUT II (Hélias *et al.*, 2001, *op. cit.*),

¹¹⁰ VIARD G., 2000. Mise à l'épreuve d'un modèle d'aide à la gestion des effluents d'élevage ; validation et potentialités d'aide à la décision en agriculture. Mémoire DAA Sciences animales, Ina-PG, CIRAD, Paris, 68 p.

¹¹¹ MEDOC J.-M., GUERRIN F., 2006. Utilisation de modèles de simulation pour élaborer une stratégie de gestion collective des lisiers de porcs à Grand Ilet Salazie – La Réunion. Rapport technique GIS Porcherie Verte, CIRAD, 72 p.

¹¹² MARTIN M., PIQUET E., LE PAGE C., GUERRIN F., 2001. MagmaS: a multi-agents system based on dynamical models coupling; application to animal wastes management. In: N. Giambiasi & C. Frydman, ESS'01, 13th European Simulation Symposium, Simulation in Industry, Multi-agent based Modelling and Simulation Workshop, Marseille (F), October 18-20, p. 881-884.

¹¹³ GUERRIN F., MEDOC J.-M., 2005. A simulation approach to evaluate supply policies of a pig slurry treatment plant by multiple farms. EFITA/WCCA 2005 Joint Conference, The 5th Conference of the European Federation for Information Technology in Agriculture, Food and Environment and The 3rd World Congress on Computers in Agriculture and Natural Resources, Vila Real (Portugal), July 25-28 2005. Paper #B03.3/PA 305.

4. la circulation d'azote dans les compartiments eau, air, sol et plante, pour évaluer l'impact environnemental des épandages avec le modèle Mobe5 (Tommasino, 1999)¹¹⁴,
5. la comparaison de différents procédés de traitement de lisier de porcs (bilans matières, dimensionnement des unités de transformation, coûts d'investissement et de fonctionnement) avec les feuilles de calculs MACSIZUT sur tableur (Le Mesre de Pas, 2001, *op. cit.*),
6. l'effet d'instruments de politique environnementale (subventions, taxes) sur la gestion des effluents avec le modèle ECHOS (Farolfi *et al.*, 2002)¹¹⁵.

Les modèles Magma, Approzut I et II et MOBE5 sont des SDH, permettant de représenter des systèmes complexes à la fois par des variables continues et discrètes (Zaytoon, 2001)¹¹⁶. Cette approche a fait également l'objet de la thèse d'Arnaud Hélias [Tt1] qui utilise les automates temporisés et leur analyse par model-checking pour développer un modèle générique d'appariement d'unités de production et de consommation selon différentes contraintes de temps et d'espace (distance).

Pour aborder la gestion collective des effluents, deux approches basées sur les SMA ont été développées:

- système MAGMAS, où les exploitations sont représentées par des instances du modèle MAGMA couplé informatiquement à la plate-forme multi-agents CORMAS (Bousquet *et al.*, 1998)¹¹⁷, dans laquelle est implanté un modèle de transfert MENS,
- modèles BIOMAS et ECHOS où chaque exploitation est représentée par un ensemble d'agents informatiques communiquant entre eux.

Le couplage de certains de ces modèles a été réalisé. Si les couplages MAGMA-MOBE5 et MAGMA-APPROZUT I n'ont pas présenté de difficulté particulière, ces trois modèles ayant été réalisés avec la même application informatique (logiciel Vensim), le couplage Vensim-VisualWorks a été plus délicat à réaliser. L'ensemble de ces couplages constitue l'ébauche du « système de modèles » fixé comme l'un des objectifs de cette ATP [Ci16].

La modélisation avec ces différents formalismes conceptuels et mathématiques a été largement décrite dans différents travaux publiés et synthétisés par François Guerrin dans son mémoire d'HDR (2007)¹¹⁸. Je reviens plus spécifiquement ci-après sur l'utilisation du modèle MAGMA qui avait fait l'objet d'une première évaluation par les agronomes (Christine Aubry et moi même) grâce aux simulations réalisées sur un cas type d'exploitation réunionnaise [Ca14]. En effet, cette première démarche a constitué l'ébauche d'autres travaux ultérieurs, en particulier ceux réalisés récemment avec le modèle COMET (cf. § II.3.3.). L'exploitation choisie pour ce test était une exploitation fréquemment rencontrée dans les zones de piémont de la Réunion (type IIb dans la typologie : UGB/SAU compris entre 2,5 et 15, UGB > 25, élevages porcin et avicole produisant des effluents liquide et solide, zone cannière, cf. § II.2.2.1.). La première étape a consisté à renseigner le modèle MAGMA avec les variables structurelles et de gestion caractérisant cette exploitation. Certaines données, par exemple concernant les surfaces, les doses ou les dates, ont dû être interprétées pour correspondre au mieux à une situation réaliste pour cette exploitation. Le premier travail de l'agronome dans le processus de simulation consiste donc, par simulations successives avec le modèle, à produire une situation jugée réaliste par rapport à ses connaissances des systèmes de production.

On peut décrire en quelques mots les éléments principaux du paramétrage de MAGMA. La production de MO concerne la nature des MO épandables et les caractéristiques structurelles de leur production : flux issus des animaux, fréquence des évacuations vers les stockages, taille des dispositifs de stockage. Chaque épandage est déclenché par un événement qui dépend de la nature des cultures (récolte, préparation du semis ou de la plantation) ou qui constitue une alerte correspondant à l'atteinte d'un seuil de remplissage pour le stockage du lisier. Sont définis également, les fenêtres temporelles d'épandage et le fractionnement des épandages sur une même sole. Le transport de MO regroupe les

¹¹⁴ TOMMASINO L., 1999. Choix et couplage de modèles du système sol-plante pour l'aide à la gestion des effluents d'élevage à la Réunion. Mémoire de DAA Génie de l'Environnement (Sol et aménagement), ENSAR, CIRAD, Rennes, 52 p. ; ce modèle n'a pas été validé, faute d'un référentiel suffisant sur le fonctionnement des systèmes biophysiques dans les conditions de la Réunion.

¹¹⁵ FAROLFI S., LE PAGE C., TIDBALL M., BOMMEL P., 2002. Management of livestock effluents in Réunion : use of a multi-agent system to analyse the economic behaviour of players. Proc. International Conference Agent BAseD Simulation III, Passau (Germany), 7-9 April 2002, 9 pp.

¹¹⁶ ZAYTOON J., 2001. Systèmes dynamiques hybrides. Hermès Sciences Publications, Paris.

¹¹⁷ BOUSQUET F., BAKAM F., PROTON H., LEPAGE C., 1998. Cormas : Common-Pool Resources and Multi-Agent Systems. Actes de la conf. IEA-AIE-98, Modelling and Simulation of Ecological/Environmental Systems, Castellon (E), 1-4 juin 1998, p.826-837.

¹¹⁸ GUERRIN F., 2007. Représentation des connaissances pour la décision et pour l'action. Mémoire d'habilitation à diriger des recherches, Université de la Réunion, 155 p.

paramètres de distance, de temps disponible et de capacité des moyens de transport et d'épandage. L'épandage proprement dit est paramétré par les surfaces, les doses maximales et les contraintes à respecter, par exemple l'adéquation entre effluent et culture, le temps nécessaire au ressuyage, la disponibilité de la main d'œuvre ... Les degrés de priorités d'action doivent être précisés : entre effluents pour une même culture et entre cultures pour un même effluent. Un module concernant une éventuelle transformation des effluents par compostage peut également être renseigné.

Cette étape de paramétrage doit nécessairement vérifier la cohérence du système simulé, tout d'abord sans aucune contrainte, puis avec les contraintes de calendrier (par exemple la disponibilité le weekend ou le temps journalier potentiellement utilisable pour l'épandage), les contraintes climatiques (interdiction d'épandage les jours de pluies, prise en compte de délais de ressuyage). Ces simulations initiales constituent la simulation de base [Ca14] à partir de laquelle le modèle servira à expérimenter et à évaluer le système. Une seconde étape consiste à adapter des règles de gestion assez facilement modifiables pour améliorer la gestion des MO dans l'exploitation, tout d'abord en jouant sur la demande des cultures (doses, priorités) puis sur l'état des stocks (priorités, seuils d'alerte). Une troisième étape correspond à la modification d'éléments structurels de l'exploitation : taille des stockages, capacité du matériel d'épandage, ajout d'une plateforme de compostage, modification d'assolement ...

Les critères retenus pour juger de la pertinence des stratégies de gestion et comparer les simulations entre elles sont d'ordre agronomique, environnemental, économique et organisationnel. Le « risque » environnemental peut être apprécié par la somme des quantités d'azote cumulées correspondant aux débordements de stocks, aux épandages sur des terres non épandables et à la surfertilisation des cultures. Le critère agronomique correspond à la quantité d'azote effectivement épandue sous forme de MO par rapport à l'épandage prévu dans le plan de fertilisation (indice de fertilisation organique). L'indicateur économique et « énergétique » est appréciable par le cumul des temps de travaux liés à la gestion de la MO et la faisabilité organisationnelle peut être évaluée par les fréquences des épandages et leur répartition dans l'année. Beaucoup de variables « intermédiaires » renseignent également sur le fonctionnement de l'exploitation simulée. Des variables de type « bilan annuel » sont également nécessaires pour vérifier la cohérence agronomique globale des simulations.

Regard critique

Ces résultats concernant la construction et l'utilisation de modèles de simulation ont mis en évidence la nécessité d'élaborer une méthodologie pour permettre l'analyse détaillée du système réel modélisé. Cette méthodologie a été résumée dans la démarche MAFATE « Modélisation et analyse de flux de matières à l'échelle de territoires » (Fig. 12, p.70) [Oc10]. Elle s'appuie sur l'expérience acquise dans les simulations de cas types (§ II.2.2.1.) et de cas réels concernant 1) la gestion des produits organiques dans les exploitations d'élevage en utilisant le modèle MAGMA, 2) l'approvisionnement d'une unité de traitement à Grand-Ilet en utilisant le modèle APPROZUT, 3) les flux de produits organiques entre producteurs et consommateurs sur le territoire du Petit et Grand Tampon avec le modèle BIOMAS et 4) plus récemment, le plan d'épandage collectif de lisier de porc dans le sud-est de l'Ille et Vilaine en utilisant le modèle COMET.

Dans cette démarche, la définition des indicateurs (Académie des Sciences, 2003)¹¹⁹ est particulièrement importante car ceux-ci, au-delà de leur intérêt pour vérifier la cohérence des modèles, définissent l'évaluation des stratégies. Ils ont également pour fonction de renseigner d'autres analyses, par exemple économique à travers la comptabilisation des coûts liés à la gestion des produits résiduels organiques ou environnementale grâce à l'articulation avec des analyses du cycle de vie (ACV). Ce dernier point a fait l'objet de davantage d'attention avec le modèle COMET (cf. § II.3.3.).

¹¹⁹ ACADEMIE DES SCIENCES (coll.), 2003. Changements d'échelles, outils communs, production d'indicateurs. In : Etudes sur l'environnement – De l'échelle du territoire à celle du continent, Rapports sur la Science et la Technologie n°15, juin 2003, pp 188-201.

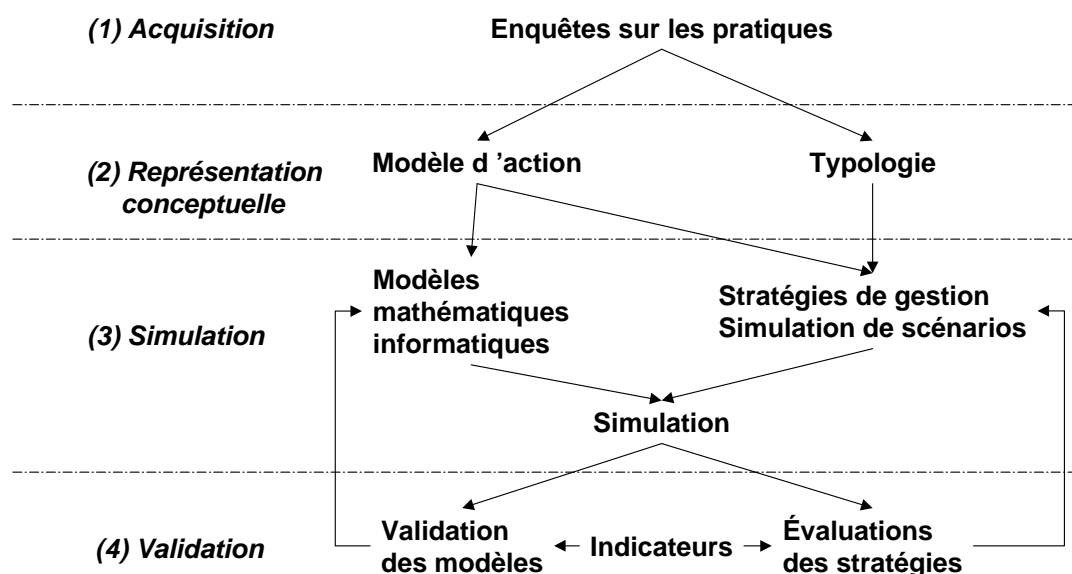


Figure 12. Démarche MAFATE : méthodologie suivie pour la construction et l'utilisation des modèles de simulation de la gestion des effluents d'élevage [Oc10].

L'utilisation des modèles de gestion des effluents a également mis en évidence deux points déterminants pour l'analyse pertinente des systèmes d'élevage :

- l'intérêt de prendre en compte l'ensemble des flux de biomasse, et pas seulement ceux concernant la gestion des effluents, au sein d'une exploitation d'élevage pour mieux intégrer le cycle des nutriments soumis à des processus décisionnels liés (cf. § II.3.2.) ;
- la nécessité de mieux renseigner les flux de nutriments vers l'environnement pour porter un diagnostic pertinent sur le risque environnemental ; une tentative en ce sens avait été effectuée dans l'ATP 99/60 avec le modèle MOBE5, mais des difficultés étaient apparues pour paramétrer correctement les équations biophysiques dans le contexte de la Réunion, la plupart de ces équations étant issues du modèle de culture STICS (Brisson *et al.*, 2003)¹²⁰ utilisé en conditions tempérées.

II.3.2. Modèles de simulation des flux de nutriments au niveau de l'exploitation d'élevage

Objet et finalités de recherche

Dans la première partie de ce mémoire, j'ai présenté des recherches analytiques et systémiques concernant les deux interfaces entre cultures et élevages, qui sont au cœur de la gestion des stocks dans une exploitation : la production et la récolte des fourrages, la production et l'épandage des effluents d'élevage. Cette gestion de stocks a pour finalité la production agricole animale ou végétale permettant à l'exploitation d'être durable au sens de Landais (1998)¹²¹. La particularité des exploitations d'élevage, c'est la concomitance de ces deux activités de production sur un espace délimité. Représenter l'ensemble du système comme un cycle, en intégrant ces activités de production et de gestion de stocks est pertinent pour comprendre les interactions au sein du système et, par là, tenter d'en améliorer la gestion pour une plus grande efficacité économique, sociale et environnementale.

Partant des efforts d'intégration de connaissances sur les pratiques et sur les systèmes biophysiques réalisés grâce à la modélisation de la gestion des effluents d'élevage (ATP 99/60, cf. § III.3.1.), avec

¹²⁰ BRISSON N., GARY C., JUSTES E., ROCHE R., MARY B., RIPOCHE D., ZIMMER D., SIERRA J., BERTUZZI P., BURGER P., 2003. An overview of the crop model STICS, *European Journal of Agronomy*, 18, 309-332.

¹²¹ LANDAIS, 1998. Agriculture durable : les fondements d'un nouveau contrat social ? *Le courrier de l'environnement*, INRA (ed.), n°33, pp 5-22.

mon collègue François Guerrin, nous avons cherché à étendre cette démarche de modélisation pour prendre en compte l'ensemble des flux de biomasse au sein de l'exploitation bovin laitier de la Réunion [Rr19]. Cette ambition s'est ensuite concrétisée par la thèse de Jonathan Vayssières (réalisée dans l'UPR Système d'élevage et produits animaux du CIRAD) « Modélisation participative et intégration des pratiques décisionnelles d'éleveurs dans un modèle global d'exploitation - Application à l'évaluation de la durabilité des élevages laitiers d'une île tropicale » [Tt3]. Cette thèse a notamment produit le modèle GAMEDE permettant de simuler le fonctionnement d'exploitations laitières réunionnaises. Ma contribution à l'encadrement de cette thèse a concerné la démarche générale de modélisation du système ainsi que la formalisation et le paramétrage des modules biophysiques concernant la conservation des fourrages sous forme de balles enrubannées (cf. § II.2.1.1.) et les émissions gazeuses lors du stockage et de la transformation des effluents d'élevage (cf. § II.2.2.4.).

De façon quasi simultanée, un projet financé par l'ACTA a démarré en 2007 avec pour objectif la construction d'un modèle dynamique à l'échelle de l'exploitation laitière (Fig. 1 p. 36) et/ou porcine. Ce modèle avait pour ambition de simuler l'effet des modifications de stratégies ou de systèmes de production sur les flux d'azote, carbone, phosphore, cuivre et zinc. Visant à renforcer l'expertise des instituts techniques sur le fonctionnement des systèmes d'élevage et leur évaluation environnementale, ce modèle a été conçu comme un outil de recherche appliquée et non directement comme un outil d'aide au conseil en exploitation. Plusieurs équipes de l'Institut de l'élevage (IE), de l'Institut de la filière porc (IFIP) et de l'INRA ont collaboré à ce projet : UMRs PL, SAS et SENAH. Mis à disposition de l'UMR SAS, j'ai participé au groupe de travail « architecture – suivi » chargé de faire une représentation conceptuelle de l'exploitation d'élevage et aux groupes « bâtiments – stockages » et « sol – plantes ». Dans ce cadre, j'ai participé à l'encadrement des thèses de Xavier Chardon (UMR PL) « Evaluation environnementale des exploitations laitières par modélisation dynamique de leur fonctionnement et des flux de matière : développement et application du simulateur Mélodie » [Tt4] et de Cyrille Rigolot (UMR SENAH) « Modélisation de l'impact environnemental des pratiques en élevage porcin à l'échelle sectorielle (animal et effluent), de l'exploitation et du cycle de vie (ACV) : incidence du niveau d'approche sur la perception des pratiques » [Tt5]. Ma contribution à l'encadrement de ces thèses a concerné la structuration générale du modèle d'exploitation MELODIE qui en a résulté, le raisonnement du module de fertilisation et d'épandage des déjections animales et le paramétrage des émissions gazeuses lors du compostage des effluents d'élevage.

Ces travaux de modélisation du fonctionnement des exploitations d'élevage, tant à la Réunion qu'en Bretagne, ont incité l'élaboration d'un projet commun soumis à l'appel à proposition du programme Agriculture et développement durable de l'ANR (Boiffin *et al.*, 2004)¹²². Les travaux de modélisation préalablement engagés ont donc été poursuivis dans le projet SPA/DD¹²³ dont l'objectif était d'analyser la contribution des systèmes de production animale à la durabilité de territoires. Combinant des travaux de modélisation des systèmes de production, d'évaluation environnementale multicritères, sur l'efficacité économique de différentes orientations technico-économiques, d'analyse des déterminants de la spatialisation des élevages et de sociologie (perception du métier d'éleveur, controverse environnementale), ce projet s'est intéressé à 3 échelles spatiales : celle de l'exploitation d'élevage, celle du groupe d'exploitations au sein d'un territoire et celle de la région agricole (la Réunion et la Bretagne). Ce projet s'est attaché à répondre à 3 grandes questions (Leterme *et al.*, 2010)¹²⁴ :

- Comment définir le champ des possibles environnementaux dans lesquels devront s'inscrire les systèmes de production animale ?
- Comment caractériser et modéliser les impacts environnementaux des systèmes de production animale ?
- Comment évaluer et prendre en compte les effets des contextes sociaux et économiques ?

Intérêt scientifique

Plusieurs questions de recherche qui intéressent ma problématique dans cette HDR ont été abordées dans la réalisation des thèses de Jonathan Vayssières, Xavier Chardon et Cyrille Rigolot, qui ont contribué au projet SPA/DD sur la modélisation des exploitations d'élevage. Ces travaux visaient à

¹²² BOIFFIN J., HUBERT B., DURAND N., 2004. Agriculture et développement durable : enjeux et questions de recherche. Dossier, INRA (Ed.), Paris, 47 p.

¹²³ Le projet ANR-06-PADD-017 « Système de production animale et développement durable » a regroupé 13 équipes de recherche de 5 institutions : Agrocampus Rennes, CIRAD, CNRS, EHESS et INRA

¹²⁴ LETERME P. *et al.*, 2010. Projet ANR-06-PADD-017 SPA/DD – Programme ADD édition 2006 – Compte rendu de fin de projet. Agence nationale de la recherche, 48 p.

répondre à la seconde question posée dans le projet :

Comment construire une représentation de l'exploitation d'élevage permettant conjointement de simuler les principales décisions des éleveurs et leurs conséquences en termes de performances agronomique et environnementale ? Selon les approches, l'accent a été mis sur les décisions tactiques (cf. § II.2.1.3.) et de pilotage « au jour le jour » du système d'élevage dans la thèse de Jonathan Vayssières [Tt3] ou davantage sur les décisions stratégiques concernant les grandes manières de conduire l'élevage dans celle de Xavier Chardon [Tt4].

Quels modèles biotechniques ou références sur le fonctionnement des systèmes biophysiques faut-il coupler ou articuler avec le modèle de gestion pour pouvoir évaluer avec pertinence les stratégies de gestion et les pratiques simulées ? Dans le cas de la Bretagne, thèse de Xavier Chardon, le choix d'un modèle existant comme STICS (Brisson *et al.*, 2003, *op. cit.*) a été privilégié, alors qu'une approche, qu'on pourrait qualifier de simplifiée (au sens informatique, mais surtout au niveau du paramétrage nécessaire des fonctions biophysiques), utilisant largement un référentiel local a été retenue pour la Réunion dans la thèse de Jonathan Vayssières.

Comment utiliser les modèles pour améliorer le fonctionnement des exploitations ? Dans le cas de la Bretagne, on vise plutôt une utilisation par les ingénieurs et techniciens leur permettant de mieux comprendre l'influence de choix de systèmes de production et de conduite d'élevage sur les performances. Les thèses de Xavier Chardon et Cyrille Rigolot étaient commanditées par les instituts techniques en relation avec l'INRA. Dans le cas de la Réunion, il s'agit davantage d'un conseil personnalisé à la mise en œuvre de techniques et d'outils de pilotage de l'élevage. La thèse de Jonathan Vayssières a été réalisée au CIRAD qui entretient des liens privilégiés avec les éleveurs laitiers et la Fédération Régionale des Coopératives Agricoles de la Réunion (FRCA).

Une autre question centrale de ces thèses était de savoir si la modélisation dynamique d'une exploitation d'élevage permettait de générer une évaluation environnementale plus riche que des indicateurs globaux s'appuyant sur des facteurs d'émission tirés de la bibliographie. Ces thèses ont privilégié l'étude des flux d'azote qui est, *a priori*, très sensible à court terme aux conditions climatiques et aux choix techniques.

Méthodologie

En accord avec Guerrin (2007, *op. cit.*), on peut distinguer les flux agissables au sens où ils sont déterminés par les actions de l'agriculteur et les flux « biophysiques » qui, dans une large mesure, se produisent indépendamment de ces actions, même si celles-ci peuvent avoir une influence, voire constituer un facteur déclenchant. Leur contrôle échappe donc largement à l'éleveur, la nature ayant une part d'autonomie certaine. Les concepts de modélisation de l'action sous-jacents à la réalisation des modèles de gestion tels que MELODIE ou GAMEDE sont décrits respectivement par Martin-Clouaire *et al.* (2003)¹²⁵ et Guerrin (2009)¹²⁶. Ces concepts privilégient, dans le cas de MELODIE, la planification et la révision du plan d'activité lorsque c'est nécessaire, et dans le cas de GAMEDE, l'action « située » (Suchman, 1987)¹²⁷ déterminée par l'état de la situation dans laquelle se trouve l'acteur (la perception de son environnement, son état interne ...), le plan constituant alors seulement un élément contingent de cette situation.

Pour la problématique qui m'intéresse, je me suis surtout focaliser sur la modélisation des processus biophysiques au sein des modèles de gestion. Dans ces modèles de flux, sont intégrées à différents degrés de précisions les pratiques des agriculteurs (cf. modélisation de l'action, Guerrin, 2009, *op. cit.*), notamment celles sous l'influence du climat. Pour les variables biophysiques, plusieurs options ont été mises en œuvre dans les travaux de thèse précédemment cités (Fig. 13) :

1. coupler des modèles biophysiques existants au modèle de gestion (cas de STICS intégralement couplé informatiquement dans le modèle MELODIE ou de STAL dans COMET),

¹²⁵ MARTIN-CLOUAIRE R., RELIER J.P., 2003. A conceptualization of farm management strategies, Proc. of EFITA-03 conference, July 5-9, Debrecen, Hungary, pp 719-726.

¹²⁶ GUERRIN F. 2009. Dynamic simulation of action at operations level. Autonomous agents and multi-agents systems, 18 (1): 156-185.

¹²⁷ SUCHMAN L., 1987. Plans and Situated Actions: The Problem of Human-Machine Communication. Cambridge University Press, Cambridge, MA, USA.

2. simplifier et intégrer les modèles existants (cas de MCP¹²⁸, MOSICAS¹²⁹, CNCPS¹³⁰, SEPATOU¹³¹ pour GAMEDE et de GEDEMO¹³², INRATION¹³³ et GRAZEIN¹³⁴ pour MELODIE et GAMEDE) en paramétrant les équations directement dans le modèle de gestion,
3. construire un référentiel de valeurs comme modalités de variables techniques (cas des émissions gazeuses pour MELODIE et GAMEDE), au sens où elles sont activées par les agriculteurs, à l'interface avec le modèle d'action implémenté.

Les deux dernières solutions évitent la difficulté du couplage dès lors que le formalisme des modèles diffère (§ II.3.1.) et permettent d'adapter les équations utiles en fonction du paramétrage possible dans les situations très diversifiées simulées. Cette adaptation pragmatique, liée aux situations simulées, est au prix d'une certaine perte de généralité. Dans tous les cas, les évaluations produites par les modèles d'exploitation sont tributaires de la validation des différents modèles, équations ou référentiel de données qui y sont intégrés.

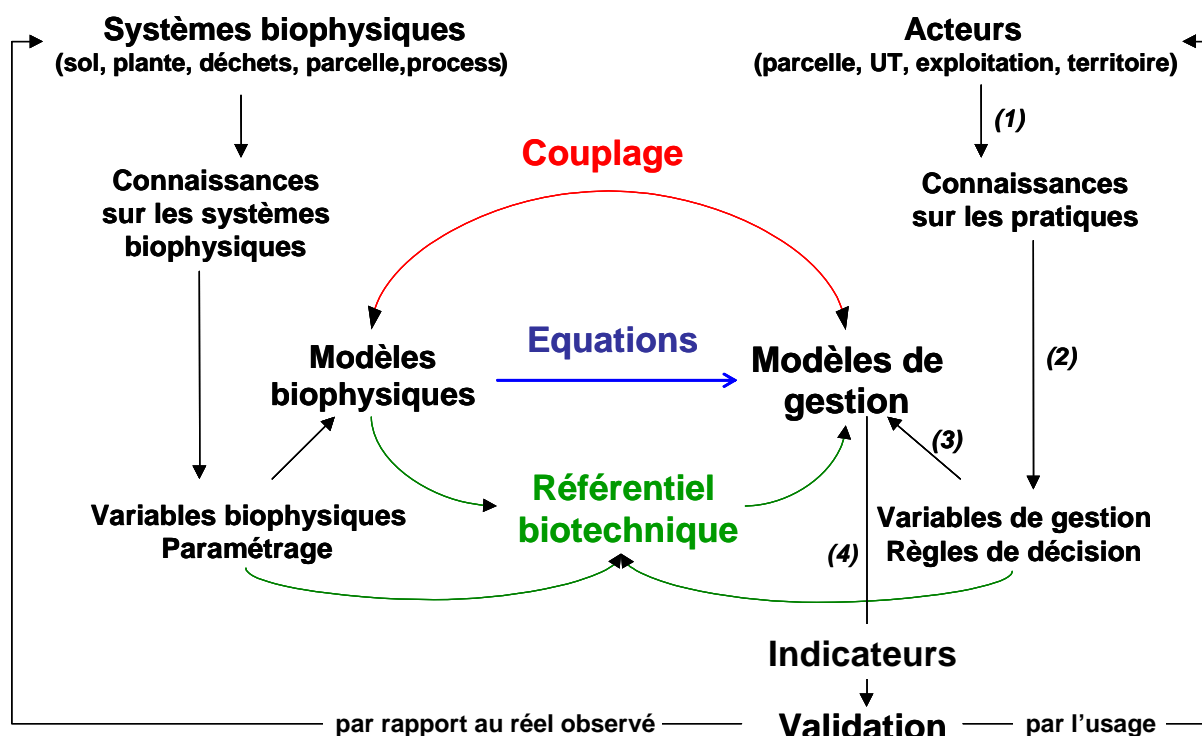


Figure 13. Problèmes posés par l'introduction, au sein de modèles de gestion de flux, de variables caractérisant les systèmes biophysiques ou les pratiques de gestion ; trois options sont possibles et combinables : couplage de modèles, extraction d'équations, interfaçage avec un référentiel biotechnique ; les différentes étapes (1) à (4) font références à la figure 12 (source : Paillat, 2006, non publié).

¹²⁸ LETEINTURIER B., OGER R., BUFFET D., 2004. Rapport technique sur le nouveau module de croissance prairiale. Centre de Recherches Agronomiques de Gembloux, Belgique, 37 p.

¹²⁹ MARTINE J.F., 2003. Modélisation de la production potentielle de la canne à sucre en zone tropicale, sous conditions thermiques et hydriques contrastées. Application du modèle. PhD thesis, INA-PG, Paris, 116 p.

¹³⁰ FOX D.G., TEDESCHI L.O., TYLUTKI T.P., RUSSELL J.B., VAN AMBURGH M.E., CHASE L.E., PELL A.N., OVERTON T.R., 2004. The Cornell Net Carbohydrate and Protein System model for evaluating herd nutrition and nutrient excretion. *Animal Feed Science and Technology* 112, 29-78.

¹³¹ CROS M.J., DURU M., GARCIA F., MARTIN-CLOUAIRE R., 2003. A biophysical dairy farm model to evaluate rotational grazing management strategies. *Agro*. 23, 105-122.

¹³² COQUIL X., FAVERDIN P., GARCIA F., 2005. Modélisation dynamique de la démographie d'un troupeau bovin laitier. In : 3R 2005, 12th Congress Rencontres autour des Recherches sur les Ruminants, 7-8 December, Paris, France, pp. 213.

¹³³ INRA, 2003. INRATION 3.0. Available from: <www.inration.educagri.fr>.

¹³⁴ DELAGARDE R., FAVERDIN P., BARATTE C., PEYRAUD J.L., 2004. Prévoir l'ingestion et la production des vaches laitières : GRAZEIN, un modèle pour raisonner l'alimentation au pâturage. In : 3R 2004, 11th Congress Rencontres autour des Recherches sur les Ruminants, 8-9 December, Paris, France, pp. 295-298.

Principaux résultats

Les résultats obtenus sont très étendus, je renvoie donc aux 3 thèses soutenues pour ce contenu. Je souhaiterais dans ce paragraphe m'attarder sur le questionnement méthodologique posé par la figure 13.

Concernant la première option, l'exemple du couplage du modèle STICS avec le modèle MELODIE est intéressant à considérer. Le groupe de travail du projet ACTA s'intéressant à l'architecture du modèle MELODIE a rapidement fait le choix d'évaluer les grandes stratégies de production laitière en utilisant le modèle de culture STICS. Celui-ci présentait de nombreux avantages au premier rang desquels le fait que la communauté française l'utilise maintenant assez largement, permettant ainsi de renseigner le modèle dans des situations variées rencontrées en France métropolitaine. La connaissance agronomique intégrée dans le modèle STICS était donc déjà très considérable et il aurait été difficile de reprogrammer les nombreuses équations nécessaires à l'évaluation des flux de nutriments au niveau des parcelles. STICS avait également l'avantage de représenter l'interaction de la plante avec le sol et de simuler le lessivage qui est un des indicateurs d'évaluation les plus pertinents dans le cas de la Bretagne. De plus, une version programmée avec le langage C était disponible et facilement interfaçable avec le modèle MELODIE (langage C++). Ainsi le modèle MELODIE comprend un module de planification des assolements et du plan d'épandage des effluents activé chaque année. Les activités, spécifiées par le plan ainsi généré, sont ensuite simulées au pas de temps journalier. Au sein du système biotechnique, chaque parcelle du module sol-culture est simulée à ce même pas de temps par le modèle STICS, en utilisant les valeurs transmises par MELODIE qui récupère en retour, au pas de temps suivant, c'est-à-dire un jour, les nouvelles valeurs produites par STICS [Ci32] (Fig. 14).

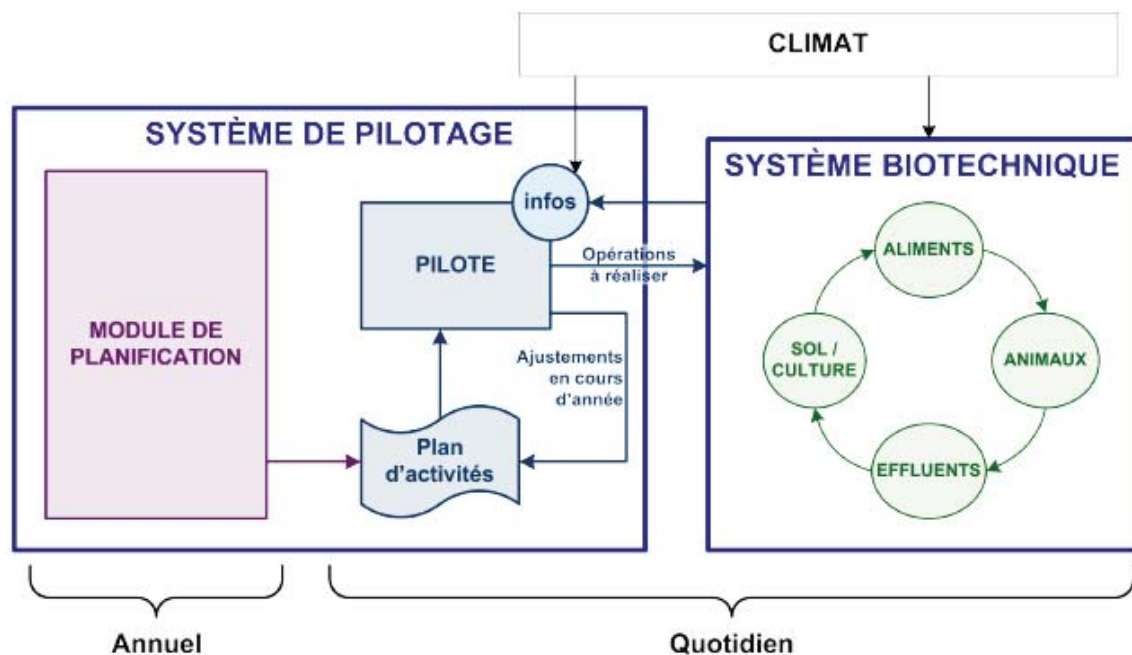


Figure 14. Fonctionnement général d'une simulation avec MELODIE [Tt3]

Chardon [Tt3] discute les résultats qui ont découlé de ce choix. Tout d'abord, il met l'accent sur le nombre de variables nécessaires au paramétrage d'un modèle de culture tel que STICS qui devient disproportionné par rapport à la précision recherchée dans le modèle d'exploitation, avec une variabilité importante des stratégies à simuler et surtout sur le fait qu'il est impossible de renseigner correctement ces variables car on ne dispose pas des données nécessaires pour toutes les parcelles. Néanmoins, le paramétrage peut être réalisé par défaut en prenant des valeurs moyennes compatibles avec des données régionales par exemple. Une autre difficulté a résidé dans les connaissances intégrées dans le modèle de culture. En effet, si le paramétrage de STICS est reconnu comme pertinent dans les situations de polyculture, typiquement avec des céréales d'hiver et du maïs, la simulation des prairies reste difficile avec STICS notamment en raison de l'accroissement du stock de N et C sous prairie puis de sa libération rapide lors d'un retournement, processus qui n'est pas représenté dans le modèle. Le

pâturage ajoute encore de la complexité à la simulation des prairies avec des productions de biomasse qui diffèrent nettement à certaines périodes de l'année des rendements mesurés en parcelles expérimentales. Enfin, la prise en compte de la dynamique de transformation des MO reste assez fruste dans STICS, avec une difficulté à traduire la minéralisation effective de l'azote avec des apports importants d'effluents d'élevage dans des sols déjà fortement pourvu en MO comme c'est le cas des situations d'élevage simulées en Bretagne.

Une des conséquences résultant des limites de ce modèle de culture est que, dans les simulations du modèle MELODIE, le lessivage est très surestimé sur prairie par rapport aux données régionales connues, ce qui a des conséquences sur la gestion de l'azote dans les autres compartiments de l'exploitation (alimentation du troupeau, émissions en bâtiments, effluents d'élevage). Par contre, les systèmes essentiellement basés sur du maïs ensilé et des céréales d'hiver, avec peu de prairies, notamment pâturées, sont plus correctement simulés. En choisissant le modèle de culture STICS, on a donc été confronté, d'un côté à un excès de précision dans le paramétrage de certaines fonctions, dans le contexte d'une exploitation de polyculture-élevage, et d'un autre côté à un déficit de représentation de fonctions essentielles pour évaluer correctement ces mêmes systèmes. Sauf à remettre en cause le choix d'interfaçage avec ce modèle de culture au profit d'une approche plus pragmatique (cf. ci-après), se pose la question de la nécessaire évolution du modèle de culture STICS pour intégrer les contraintes propres aux systèmes d'élevage. Les deux modèles STICS et MELODIE ayant été développés à l'INRA, cette décision de modification a pu être prise assez facilement, semble-t'il, mais on perçoit ici toute la difficulté que pose les interfaçages entre modèles développés dans des contextes variés et avec des objectifs différents. On rejoint ici un des points abordés dans l'ATP 99/60 s'agissant du couplage entre modèles (cf. § III.3.1.).

La seconde option méthodologique qui consiste à prendre des équations décrites dans des modèles existants et à les intégrer au sein même du modèle d'exploitation (Fig. 13), ou plus simplement issues de la bibliographie, est donc une alternative au couplage du modèle biophysique avec le modèle de gestion. Ce choix a été réalisé dans le modèle MELODIE concernant la production animale (pas de modèle approprié existant) et, plus largement encore, dans le modèle GAMEDE concernant la production végétale et la production animale. En effet, le choix du modèle STICS pour simuler les exploitations herbagères de la Réunion aurait posé problème, car le référentiel nécessaire à son paramétrage correct n'existe pas (Ruiz, 2003)¹³⁵, qui plus est avec de la prairie (cf. ci-dessus). Pour cette raison de paramétrage, la réécriture des équations de STICS dans le modèle GAMEDE aurait conduit à un résultat semblable (cf. expérience conduite dans l'ATP 99/60 avec le modèle MOBE5 ; Tommasino, 1999, *op. cit.*). Un choix et une adaptation des équations extraites de modèles existants au besoin du modèle d'exploitation sont donc nécessaires. C'est ce qui a été réalisé par exemple à partir du modèle MOSICAS en ce qui concerne la croissance de la canne à sucre. Des simplifications drastiques ont été nécessaires ; le sol n'a par exemple pas été modélisé en raison des difficultés à paramétrer correctement la minéralisation de la MO dans les différentes situations pédoclimatiques de la Réunion.

En conséquence, le modèle GAMEDE ne peut fournir d'indications sur le lessivage de nitrates, critère qui pourrait pourtant s'avérer déterminant dans le bilan azoté à certaines périodes de l'année, bien que le sol soit toujours couvert d'une végétation prairiale en croissance continue en dépit d'un ralentissement en saison sèche et fraîche. Le lessivage et l'organisation dans le sol sont donc considérés comme le défaut de bilan du système, ne pouvant être relié nécessairement à une pollution en raison des difficultés d'interprétation de ces processus dans le contexte réunionnais (fortes pluies, importance de la zone désaturée, turn-over de la MO [Ca12]). Cependant, la suppression de tout un module (ici le lessivage) limite fortement les fonctions d'évaluation du modèle d'exploitation. D'autres types de simplification qui ne fasse pas ce sacrifice tout en éliminant les inconvénients liés aux modèles biophysiques trop mécanistes seraient à rechercher, par exemple par l'usage de la métamodélisation : modéliser le fonctionnement de modèles mécanistes comme des boîtes noires dans la gamme des valeurs qui intéressent le niveau gestion (cf. approches développées par le réseau MEXICO)¹³⁶.

¹³⁵ RUIZ L., 2003. Valorisation agronomique des effluents et évaluation du risque environnemental - Propositions pour l'utilisation du modèle Stics. In : F. Guerrin, J.-M. Paillat (éditeurs scientifiques), 2003. Modélisation des flux de biomasse et des transferts de fertilité - cas de la gestion des effluents d'élevage à l'île de la Réunion. Restitution des travaux de l'Atp 60/99. Actes du séminaire des 19-20 juin 2002, Montpellier, France, Cirad, Colloques, Cédérom.

¹³⁶ Ecole chercheur « Analyse de sensibilité et exploration de modèles » INRA, CEMAGREF et IFREMER, 7-11 juin 2010, Giens. Le réseau MEXICO (Méthodes d'EXploration Informatique de modèles Complexes) regroupe des chercheurs du département Mathématiques et Informatique Appliquées de l'INRA et des scientifiques de divers organismes dont le CEMAGREF, l'ULCO, le CIRAD et l'IFREMER.

Dans tous les cas, l'évaluation environnementale ne peut être que partielle. Pour chaque système que l'on cherche à évaluer, il est nécessaire de définir ce que l'on entend par évaluation environnementale : selon quels critères, à quelles échelles temporelle et spatiale, avec quels indicateurs doit-elle être faite (cf. la réflexion ébauchée à ce sujet par François Guerrin dans les perspectives de son HDR ; Guerrin, 2007, *op. cit.*) ?

Dès lors, dans les 2 modèles de gestion, aussi bien pour MELODIE que pour GAMEDE, il aurait peut-être été plus pertinent de recourir à un référentiel local, issu de données d'expérimentations, pour simuler le lessivage. Ce faisant, la généricité du modèle en aurait été très affaiblie et les simulations seraient restées dépendantes de la qualité des données acquises localement. Cette 3^{ème} option méthodologique (Fig. 13) a été celle qui a prévalu dans les 2 modèles pour simuler les émissions gazeuses tout au long de la manipulation des effluents. Ce choix a été déterminé par l'absence de modèle biophysique et d'équations suffisamment génériques qui nécessitaient un paramétrage facilement accessible dans les situations d'élevage simulées. Pour illustrer cette 3^{ème} option, je décris ci-après le cas de la modélisation des émissions gazeuses lors du compostage dans le modèle MELODIE et de celui de la conservation des fourrages dans le modèle GAMEDE.

Une des utilisations du modèle MELODIE a concerné l'évaluation environnementale (pertes d'azote, émissions de NH_3 , N_2O et CH_4) de la combinaison de 3 modalités de gestion des bâtiments (caillebotis intégral, litière de paille ou litière de sciure de bois), de 2 modalités de stockage (lisier en fosse non couverte, fumier sur plateforme couverte) et de 4 modalités de transformation des effluents porcins stockés : traitement biologique du lisier par nitrification-dénitrification ou méthanisation, compostage du lisier sur de la paille (procédé Guernévez®), compostage du fumier obtenu après évacuation et stockage de la litière de paille des bâtiments [Ai12]. Pour les différents compartiments du système d'élevage pris en compte (bâtiments, stockage et traitement des effluents), il s'agissait de renseigner les facteurs d'émissions pour chacun des gaz en prenant des références expérimentales ou issues de la bibliographie, et de moduler ces facteurs d'émissions par des facteurs de correction sous la dépendance de pratiques de gestion ou de situations d'élevage. A titre d'exemple, les données issues de nos expérimentations sur le compostage (cf. § II.2.2.4.) ont été interprétées sous cette forme conduisant à l'interfaçage d'un tableau de références avec le module « bâtiments-stockage-transformation » du modèle MELODIE (Tab. 3). Les mesures d'émissions gazeuses (N-NH_3 , $\text{N-N}_2\text{O}$, C-CO_2 , C-CH_4) et les mesures de pertes d'eau, de MS et d'azote sur les 15 tas suivis dans la halle expérimentale de l'UMR SAS à Rennes et sur un tas de l'expérimentation réalisée avec le procédé Guernévez® (cf. § II.2.2.4.) ont été classées dans une grille croisant 3 classes de rapport C/N et 3 classes de teneur en MS. Parmi les 9 classes « C/N x teneur en MS » obtenues, certaines correspondaient à plusieurs tas, la moyenne des valeurs mesurées a alors été calculée ; d'autres ne correspondaient qu'à une seule valeur qui a été retenue ; parfois, aucune donnée expérimentale ne correspondait à la classe, dans ce cas, nous avons procédé par extrapolation à partir des valeurs des classes adjacentes, tout en gardant la cohérence observée dans les expérimentations. Ces émissions ou pertes ont ensuite été rapportées, pour chacune des 9 classes, à l'émission maximale observée, constituant ainsi le facteur de correction. Les effets du nombre de retournement, de la température extérieure et de la durée de compostage ont été déduits de différents essais ponctuels en halle expérimentale ou en situation d'élevage (expérimentations de compostage de fumier de porc réalisées par l'IFIP ; suivi du compostage de fumier de vaches laitières, réalisé par l'UMR SAS pour le CORPEN [Rr22]).

Une autre possibilité aurait été d'intégrer la modélisation statistique des émissions au compostage [Ai16] dans le modèle MELODIE. Sans doute plus précis en ce qui concerne les facteurs étudiés (N disponible, C biodégradable, densité de la matière sèche, humidité), ces modèles de prédiction des émissions par régression linéaire multiple (cf. § II.2.2.4.) ne donnaient pas de réponse, requise pour l'évaluation avec MELODIE, concernant l'influence de la température extérieure, de la pratique de retournement, de la durée de compostage. De plus, les variables d'entrée de ces modèles statistiques (fractions Van Soest, azote soluble, densité de MS, humidité ...) ne sont pas décrites directement dans MELODIE. Par ailleurs, nos modèles statistiques ne prédisent pas l'émission de N_2O ni celle de CH_4 . Cependant, ces modèles de régression auraient pu être utilisés pour aider à construire le référentiel du module « bâtiments-stockage-traitement » du modèle MELODIE. Cette approche n'a pas été retenue dans le cas présent, mais elle a été expérimentée ultérieurement pour calculer les émissions d'ammoniac, de gaz carbonique et d'eau de situations types de compostage [Ci36]. Une telle démarche pourrait être mise en œuvre pour renseigner des modèles d'exploitation.

Tableau 3. Facteurs d'émissions et facteurs de correction, utilisés dans le module « bâtiments-stockage-traitement » du modèle MELODIE, pour prédire les émissions gazeuses et les pertes de matières (MS, N) et d'eau du tas lors du compostage de fumier de porc (d'après [Rr21]) [Ai12].

| | | émissions | | | | pertes | | |
|-------------------------------|---------|-------------------|--------------------|-------------------|-------------------|---------|------------------|------|
| | | N-NH ₃ | N-N ₂ O | C-CO ₂ | C-CH ₄ | N total | H ₂ O | MS |
| Facteur d'émission (1) | | 0.45 | 0.03 | 0.45 | 0.015 | 0.50 | 0.50 | 0.55 |
| Facteurs de correction (2) | | | | | | | | |
| Effet Type de fumier | | | | | | | | |
| | MS (%) | | | | | | | |
| C/N < 15 | <25 | 0.4 | 1.0 | 0.6 | 1.00 | 1.0 | 0.8 | 0.6 |
| | 25-35 | 1.0 | 0.3 | 0.9 | 0.03 | 1.0 | 0.8 | 0.9 |
| | >35 | 0.7 | 0.1 | 0.8 | 0.02 | 0.8 | 0.3 | 0.8 |
| 15<C/N< 25 | <25 | 0.4 | 0.5 | 1.0 | 0.24 | 1.0 | 0.7 | 1.0 |
| | 25-35 | 0.8 | 0.3 | 1.0 | 0.04 | 0.9 | 1.0 | 1.0 |
| | >35 | 0.5 | 0.1 | 0.8 | 0.02 | 0.5 | 0.5 | 0.8 |
| C/N > 25 | <25 | 0.3 | 0.5 | 1.0 | 0.10 | 0.7 | 0.6 | 1.0 |
| | 25-35 | 0.5 | 0.3 | 1.0 | 0.02 | 0.6 | 0.9 | 1.0 |
| | >35 | 0.2 | 0.1 | 0.8 | 0.02 | 0.2 | 0.6 | 0.8 |
| Effet Nombre de retournements | | | | | | | | |
| | 0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 |
| | 1 | 1.0 | 1.2 | 1.2 | 1.0 | 1.0 | 1.1 | 1.2 |
| | 2 | 1.0 | 1.3 | 1.3 | 1.0 | 1.0 | 1.2 | 1.3 |
| Effet Temperature extérieure | | | | | | | | |
| | 5 | 0.7 | 1.0 | 0.8 | 0.8 | 0.8 | 0.8 | 0.8 |
| | 20 | 0.9 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 |
| | 35 | 1.2 | 1.0 | 1.1 | 1.1 | 1.1 | 1.1 | 1.1 |
| Effet Durée de compostage | | | | | | | | |
| | <2 mois | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 |
| | >6 mois | 1.1 | 1.4 | 1.4 | 1.4 | 1.4 | 1.4 | 1.4 |

(1) Facteur d'émission, exprimé en kg kg⁻¹ de l'élément total initial (N, C, H₂O, MS) ; il correspond au maximum d'émission ou de perte mesuré dans toutes les situations de compostage étudiées (classification selon le rapport C/N et la teneur en MS) pour une période de 2 mois sans retournement sous une température extérieure de 25°C.

(2) Facteur de correction : coefficient multiplicateur du facteur d'émission maximale pour obtenir le facteur d'émission propre à chaque situation.

Le cas de la qualité des ensilages dans le modèle GAMEDE relève également de cette même approche, qui consiste à élaborer des variables biotechniques en se basant sur un référentiel de données (Lewis *et al.*, 1999)¹³⁷, dans ce cas issues des expérimentations conduites durant ma thèse (cf. § II.2.1.1.) et des essais de l'Union des associations foncières pastorales qui ont suivi. La teneur en MS et l'apport de conservateur sont les variables implémentées dans GAMEDE pour définir *a priori* la qualité des ensilages en balles enrubannées. Quatre classes de qualité des ensilages, représentées sur un abaque, ont été définies à partir de la teneur en MS de l'ensilage et de la quantité de conservateur apporté [Ai11]. Cette qualité intervient ensuite dans l'efficacité alimentaire du fourrage ensilé ingéré. En effet, les ensilages mal conservés sont moins bien ingérés et présentent une proportion plus importante d'azote soluble qui augmente la proportion de PDIN (protéines digestibles intestinales permises par l'azote) au détriment des PDIE (protéines digestibles intestinales permises

¹³⁷ LEWIS, K.A., NEWBOLD, M.J. AND TZILIVAKIS, J. 1999. Developing an emissions inventory from farm data. Journal of Environmental Management, 55, 183-197.

par l'énergie), conduisant à une excrétion azotée supérieure dans les urines. Les facteurs de corrections de l'ingestion, des PDIN et des PDIE sont basés sur les équations d'Andrieu et Demarquilly (1987, *op. cit.*).

Si l'apport de conservateur est renseigné directement à partir de la pratique de l'éleveur, la teneur en MS dépend à la fois de cette pratique (temps de ressuyage alloué par l'éleveur) et des conditions climatiques et de rendement fourrager. Dans ce cas, ce sont des équations obtenues lors des expérimentations conduites durant ma thèse [Rd2] qui ont été intégrées dans GAMEDE [Ai11] :

$$GDMC = DT \cdot DI \cdot Ir \quad [7]$$

avec $GDMC$, le gain de teneur en matière sèche (kg MS kg⁻¹ MF), DT , le temps de ressuyage, DI , l'intensité de séchage (kg MS kg⁻¹ MF h⁻¹) qui dépend de l'ETP (évapotranspiration potentielle) et de la pluie et Ir , une fonction linéaire décroissante dépendant du rendement fourrager (kg MS ha⁻¹) établi par moi-même [Rd2].

Regard critique

Ces différentes manières d'intégrer les processus biophysiques dans des modèles de gestion posent la question plus générale de la granularité de la représentation et du pas de temps choisi pour la simulation (Barreteau & Treuil, 2009)¹³⁸. On constate en effet vraisemblablement un excès de précision lorsqu'on cherche à intégrer des modèles biophysiques complexes, ou difficiles à paramétrer, qui n'ont pas été réalisés dans une finalité de gestion (cas de STICS dans MELODIE par exemple). À l'inverse, le modèle de gestion peut s'avérer trop précis dans la représentation des activités de l'agriculteur, alors que l'évaluation agronomique et environnementale restera très grossière faute d'une représentation suffisamment fine et pertinente des processus biophysiques que les activités de gestion sont censées influencer, voire déclencher (cas de MAGMA par exemple). La simplification doit donc être recherchée dans les deux cas pour aboutir à un compromis acceptable, ce que propose le modèle GAMEDE par exemple. De fait, tout dépend de l'objectif poursuivi par l'élaboration du modèle.

Au delà, même si les recettes ne sont pas évidentes tant les questions posées par le choix d'un modèle, sa justification et les systèmes modélisés diffèrent, il serait intéressant de mieux formaliser une telle démarche de compromis entre la représentation des processus biophysiques et de gestion (cf. § III.2.1.). On notera que très peu de travaux se sont intéressés à cette question¹³⁹, notamment du fait de la rareté des travaux de modélisation dynamique de la gestion des systèmes de production agricole, alors que davantage de modèles utilisent l'optimisation, comme l'a souligné Guerrin (2007, *op. cit.*). La construction des modèles biophysiques suit, le plus souvent, une logique de représentation propre, souvent assez fine, des processus, indépendamment de leur utilisation dans une situation de gestion, modélisée ou non. Dans cet ordre d'idée on peut citer les travaux réalisés avec les modèles FASSET¹⁴⁰ et IFSM¹⁴¹, décrits dans la thèse de Xavier Chardon [Tt4], ceux conduits avec le modèle APSIM¹⁴². Dans ces approches, l'interaction dynamique entre les processus de gestion et les processus biophysiques n'est pas ou peu représentée, d'où l'enjeu du développement des modèles MELODIE à l'INRA et GAMEDE au CIRAD. La démarche en cours à l'INRA autour de la plateforme RECORD¹⁴³ devrait être propice à l'interrogation pluridisciplinaire pour traiter ces questions.

Se pose également la question du choix des indicateurs nécessaires pour valider les modèles et évaluer les stratégies de gestion (Fig. 13), ce qui renvoie aux questions plus fondamentales de savoir ce qu'on entend par validation (cf. Rykiel, 1989)¹⁴⁴ et par évaluation environnementale (Guerrin, 2007,

¹³⁸ BARRETEAU O., TREUIL J.-P., 2009. De l'individuel au collectif, de l'optimisation à la coordination. In : Modélisation de l'environnement : entre nature et sociétés, D. Hervé & F. Laloë (Ed.), Ed. Quae, NSS-dialogues, p. 53-70.

¹³⁹ THORNTON P., HERRERO M., 2001. Integrated crop-livestock simulation models for scenario analysis and impact assessment. *Agricultural Systems*, 70 :581-602.

¹⁴⁰ Farm ASSEssment Tool (Jacobsen et al. 1998)

JACOBSEN B.H., PETERSEN B.M., BERNTSEN J., BOYE C., SØRENSEN C.G., SØGAARD H.T., HANSEN J.P. 1998. An integrated economic and environmental farm simulation model (FASSET). In Danish Institute of Agricultural and Fisheries Economics, Report No. 102. Copenhagen, Denmark: Danish Institute of Agricultural and Fisheries Economics.

¹⁴¹ Integrated Farm Systems Model (Rotz and Coiner 2004)

ROTZ C.A., COINER C.U., 2004. The integrated farm system model: reference manual.

¹⁴² MCCOWN R., HAMMER G., HARGREAVES J., HOLZWORTH D., FREEBAIRN D., 1996. Apsim: A novel software system for model development, model testing and simulation in agricultural systems research. *Agricultural Systems*, 50: 255-271.

¹⁴³ Plateforme de modélisation et de simulation des agro-systèmes ; INRA, départements Environnement et Agronomie et Mathématiques et Informatique Appliquées ; <http://www4.inra.fr/record>

¹⁴⁴ RYKIEL E., 1996. Testing ecological model: the meaning of validation, *Ecological Modelling*, 90: 229-244.

op. cit.). La complexité des modèles de gestion et des modèles biophysiques implique le plus souvent une validation par rapport au réel observé très partielle. Cette validation des modèles n'est donc souvent permise que par leur construction même d'où l'importance du raisonnement précédent et du choix des modèles, équations ou référentiels techniques concernant la représentation des processus biophysiques. L'usage du modèle avec les acteurs est une solution pour évaluer la validité du modèle de gestion, en tant qu'outil opérationnel, à condition que le modèle soit assez facile à paramétrer, que les simulations ne soient pas trop longues et que les résultats de celles-ci soient correctement interprétables. Un avis d'expert agronome est souvent requis pour s'assurer dans un premier temps que les ordres de grandeur soient bien respectés et que les effets soient plausibles. Dès lors, utiliser le modèle et formaliser la démarche de simulation (méthodologie de simulation, cf. § III.2.2.) restent tout aussi importants que construire le modèle lui-même. Des itérations sont d'ailleurs souvent nécessaires (cf. démarche MAFATE, Fig. 12, p. 70). Sans parler vraiment d'interdisciplinarité, comme la définit Jollivet (2009)¹⁴⁵ à propos des sciences humaines et sociales et des sciences biophysiques, il s'avère que l'interaction quasi permanente entre le modélisateur et l'agronome (pour ce qui nous concerne) devient ainsi une des conditions de bonne réussite de cette entreprise (cf. expérience avec le modèle COMET, § II.3.3.). Cette interaction s'exerce tout au long du processus, depuis l'analyse du système jusqu'à son évaluation par le biais d'un modèle.

II.3.3. Articulation des modèles de simulation avec l'évaluation environnementale multicritères

Objet et finalités de recherche

Les modèles de simulations de la gestion des effluents d'élevage ou plus largement de flux de nutriments à l'échelle de l'exploitation agricole, au développement desquels j'ai participé, présentent l'intérêt d'une représentation dynamique des interactions entre activités d'élevage et processus biophysiques, certains flux, comme celui de l'azote, étant très dépendants de cette dynamique. Ils permettent ainsi de tester des choix stratégiques ou des techniques alternatives pour réduire autant que possible les pertes de nutriments vers l'eau et l'air, notamment celles qui sont préjudiciables à l'environnement. Il en résulte des cinétiques de flux en différents points du système modélisé, riches d'information. Néanmoins, ces indicateurs sont multiples et difficiles à interpréter (*i.e.* une amélioration d'un indicateur peut résulter dans la détérioration d'un autre). Cette approche multicritères a été prise en compte par Vayssières *et al.* (2009)¹⁴⁶ qui ont fait l'effort de synthétiser les résultats sous une forme de schéma en radar regroupant un nombre limité d'indicateurs pertinents, environnementaux (par exemple l'efficacité azotée), technico-économique (par exemple la production laitière dont le revenu de l'éleveur dépend directement) et sociaux (par exemple le temps de travail) pour rendre compte de la durabilité des exploitations d'élevage. Cette approche simplificatrice et didactique pour une restitution aux éleveurs s'avère cependant limitée si on veut juger plus complètement de l'impact environnemental d'une stratégie ou d'un système d'élevage.

Les travaux utilisant l'analyse du cycle de vie pour l'évaluation environnementale multicritères de SPA (Basset-Mens et van der Werf, 2005 ; Aubin et van der Werf, 2009 ; [Ai5])¹⁴⁷ sont de plus en plus nombreux. Cette méthode trouve sa pertinence dans la prise en compte simultanée d'impacts potentiels multiples et permet de comptabiliser les effets directs sur l'environnement (au sein de l'exploitation) mais également les effets indirects (concernant la production des intrants pour l'exploitation). Cette méthode a, cependant, l'inconvénient de considérer des systèmes « moyens », dans des conditions standard de production et en comptabilisant des effets moyens. Les aspects dynamiques et spatiaux liés à la production et aux pratiques des agriculteurs ne sont pas pris en compte, bien que des recherches tentent d'utiliser l'ACV pour l'évaluation environnementale à l'échelle

¹⁴⁵ JOLLIVET M., 2009. L'interdisciplinarité : une démarche de recherche à construire. In : Modélisation de l'environnement : entre natures et sociétés, D. Hervé & F. Laloë (Ed.), Ed. Quae, NSS-dialogues, p. 13-17.

¹⁴⁶ VAYSSIERES J., BOCQUIER F., LECOMTE P., 2009. GAMEDE: A global activity model for evaluating the sustainability of dairy enterprises. Part II - Interactive simulation of various management strategies with diverse stakeholders. *Agricultural Systems* 101(3), p. 139-151.

¹⁴⁷ BASSET-MENS C., VAN DER WERF H.M.G., 2005. – Scenario-based environmental assessment of farming systems: the case of pig production in France. *Agriculture Ecosystems and Environment*, 105 (1–2), 127-144.

AUBIN J., VAN DER WERF H.M.G., 2009. Pisciculture et environnement, apports de l'Analyse de Cycle de Vie. *Cahiers d'Agriculture*, 18 (2), 220-226.

d'un territoire aient été amorcées par Payraudeau et Van der Werf (2005)¹⁴⁸. Ainsi, se rapprochant de l'évaluation des impacts sur les écosystèmes, cette méthode s'éloigne de la réalité des pratiques, très diverses et adaptables notamment aux conditions climatiques, techniques et organisationnelles, rendant sans doute plus difficile leur amélioration.

La méthode d'analyse du cycle de vie, dans la mesure où elle agrège des flux d'émissions vers l'environnement considéré globalement, est très complémentaire de la simulation avec les modèles de gestion qui eux décrivent ces flux dans le temps, dès lors que des processus biophysiques y sont représentés quelles qu'en soient les modalités (modèles biophysiques, équations ou référentiels de données, cf. § II.3.2.). Au sein, du projet SPA/DD, un travail a donc été réalisé pour articuler utilisation des modèles de simulation et ACV. Cette approche de couplage de ces deux démarches a concerné la simulation d'une exploitation porcine avec le modèle MELODIE (Méda, 2008 ; [Tt5])¹⁴⁹ et le plan d'épandage collectif de lisier de porc avec le modèle COMET [Ai8, Ai17, Ac18, Ci23, Ci26, Ci28, Ci29, Ci30, Ci31]. Je présenterai ce dernier cas d'étude pour illustrer mes recherches sur ce thème qui ont été menées en collaboration avec Santiago Lopez-Ridaura (Post-doctorant que j'ai co-encadré en 2006 et 2007, à l'UMR SAS), Hayo van der Werf (UMR SAS) et François Guerrin (UPR Recyclage et risque).

Intérêt scientifique

L'intérêt scientifique de ces travaux peut être résumé par les questions de recherche principales suivantes :

Comment modéliser, au plan conceptuel, puis, mathématique et informatique, les SPA à un niveau qui dépasse l'exploitation agricole, celui d'un territoire ? La notion de granularité de représentation (Barreteau & Treuil, 2009, *op. cit.*) prend ici encore davantage d'importance étant donné le nombre d'entités (exploitations, parcelles, élevages ...) devant être pris en compte.

Comment ces outils de simulation dynamique et d'analyse environnementale multicritères, et leur couplage ou articulation éventuels, peuvent-ils aider à raisonner l'organisation collective pour mieux gérer les effluents d'élevage, dans une perspective d'aide à la décision de collectifs d'éleveurs ?

Comment étudier, grâce à l'utilisation des modèles, les interactions entre la gestion individuelle et la gestion collective d'une même ressource, dans le cas traité ici, du lisier porcin ? En effet, une amélioration des impacts environnementaux du plan collectif peut être compensée par une détérioration de certaines situations individuelles. Se pose alors la question de la prise en compte de la variabilité des situations individuelles liées entre elles par une organisation collective plus ou moins rigide.

Comment élaborer et développer une méthodologie de simulation permettant d'utiliser de façon raisonnée les modèles de simulation et l'analyse environnementale multicritères ? Devant la quantité de résultats fournis par les modèles simulant des systèmes complexes et l'extrême complication des variables et paramètres à renseigner, il devient primordial d'organiser les simulations de façon cohérente par rapport à un objectif d'évaluation et d'assurer la traçabilité des informations obtenues tout au long de ce processus. Cette traçabilité doit être conçue depuis le paramétrage des modèles qui peut nécessiter des opérations de préparation de leurs données d'entrée, jusqu'aux résultats qui nécessitent aussi, pour certains d'entre eux, des calculs complémentaires.

Méthodologie

Le cas présenté s'appuie sur une situation étudiée en Bretagne. Dans cette région, plus de la moitié des cantons sont déclarés en zone d'excédent structurel (ZES : plus de 170 kg de N d'origine animale par hectare épandable ; directive Nitrates 91/676/CEE). Pour se conformer au plan de résorption de l'azote, en traitant l'azote excédentaire ou en l'exportant dans une zone de charge azotée inférieure à 140 kg N d'origine animale par ha (MIRE, 2004)¹⁵⁰, un groupe d'éleveurs du Sud-Est de l'Ille et Vilaine a élaboré un plan d'épandage collectif de lisier de porc. Pour cette étude, nous n'avons retenu qu'une

¹⁴⁸ PAYRAUDEAU S., VAN DER WERF H.M.G., 2005. Environmental impact assessment for a farming region: a review of methods. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 107 (1), p. 1-19.

¹⁴⁹ MEDA C., 2008. Évaluation environnementale des systèmes de production porcine – Intérêt d'une approche combinant modélisation et Analyse du Cycle de Vie. Mémoire de Master, Agrocampus Ouest, Rennes (FRA).

¹⁵⁰ MIRE (Mission Régionale et Interdépartementale de l'Eau), 2004. La résorption des excédents d'azote en Bretagne. Préfecture de la Région Bretagne, Rennes, France.

partie de ce plan, soit 57,6 t d'azote provenant de 11 élevages porcins qui doivent être transférées chez 22 prêteurs de terres à une distance moyenne de 44 km (33 à 55 km) [Ac18].

La méthodologie d'articulation entre les modèles de simulation et l'analyse environnementale multicritères repose sur 4 étapes. En utilisant l'ACV (Guinee *et al.*, 2002)¹⁵¹, nous avons tout d'abord comparé la performance environnementale de ce plan collectif (scénario « Transfert »), à celle du traitement biologique (scénario « Traitement »), très répandu en Bretagne (Levasseur et Lemaire, 2006)¹⁵² et qui vise l'élimination de l'azote ammoniacal du lisier par nitrification-dénitrification et l'exportation de l'azote organique après compostage du refus de séparation de phase du lisier brut [Ai8]. Le scénario « Transfert » comprend les processus de stockage à la ferme, de transport du lisier vers le lieu d'épandage, de stockage intermédiaire dans une poche souple et mobile, puis d'épandage sur les parcelles. Le scénario « Traitement » comprend les processus de stockage à la ferme, de transport du lisier vers le lieu de traitement, de traitement biologique incluant le compostage du refus, de transport du compost jusqu'à un lieu d'utilisation potentielle (zone maraîchère) et d'épandage du compost. La production de lisier dans les bâtiments d'élevage et la production des cultures sur les parcelles sont considérées identiques et ne sont donc pas prises en compte dans les scénarios [Ci23, Ci26].

Compte tenu de la très forte sensibilité du plan d'épandage collectif aux aspects logistiques et à la coordination entre acteurs, nous avons dans un second temps utilisé le modèle COMET pour tester la faisabilité du plan d'épandage collectif soumis aux contraintes de sols, cultures, climat et logistique, et en estimer les conséquences sur les émissions gazeuses. COMET, implémenté avec le logiciel Vensim® simule le transfert d'effluents d'élevage d'exploitations productrices vers des exploitations consommatrices, via un dispositif de stockage intermédiaire représentant la poche mobile dont l'utilisation est prévue [Ci28, Ac18]. Composé de plusieurs modules simulant la production, le stockage, le transport et l'épandage d'effluents d'élevage ainsi que les principales émissions polluantes (NH₃ et CH₄) durant le stockage et l'épandage, COMET est basé sur le couplage de modèles existants [Ci28, Cs19] : MAGMA (Guerrin, 2001, *op. cit.*), APPROZUT (Guerrin, 2004, *op. cit.*) et STAL (Morvan et Leterme, 2001, *op. cit.*), ce dernier simulant l'émission de NH₃ à l'épandage ; un module original simulant les émissions de NH₃ et CH₄ au stockage, basé sur les équations de Loyon *et al.* (2007)¹⁵³ et Pelletier *et al.* (2006)¹⁵⁴ y a également été ajouté, ainsi que le module « Terragator » simulant l'épandage sur les terres en prêt. Le paramétrage de COMET sur la situation étudiée est décrit dans Paillat *et al.* (2009) [Ci31].

Dans un troisième temps, nous avons considéré les résultats des simulations de COMET pour renseigner différentes variantes du scénario « Transfert » et évaluer leurs impacts environnementaux en utilisant à nouveau l'ACV. Les variantes ainsi évaluées concernaient différentes contraintes de gestion liées au climat, à l'aptitude des sols à l'épandage, à la disponibilité du matériel d'épandage [Ci30, Ac18].

Dans une dernière étape, COMET a été utilisé pour analyser la variabilité des situations des 11 élevages porcins en terme de logistique d'épandage et d'émissions gazeuses en découlant, ainsi que pour comprendre l'interaction entre les niveaux individuel et collectif de gestion [Cs19].

Principaux résultats

La comparaison des scénarios « Traitement » et « Transfert » avec l'ACV montre que lorsqu'on prend en compte la substitution des engrais, le scénario « Transfert » a une meilleure performance environnementale pour les catégories d'impact « Eutrophisation », « Acidification » et « Consommation d'énergie non renouvelable » ; pour la catégorie d'impact « Changement climatique », elle est identique entre les deux scénarios [Ac18]. Cette supériorité est vraie à condition que la valeur fertilisante en azote, phosphore et potassium du lisier se substitue à l'engrais chimique qui aurait été épandu

¹⁵¹ GUINEE J.B., GORREE M., HEIJUNGS R., HUPPES G., KLEIJN R., DE KONING A., VAN OERS L., WEGENER SLEESWIJK A., SUH S., UDO DE HAES H.A., DE BRUIJN H., VAN DUIN R., HUIJBREGTS M.A.J., 2002. Life cycle assessment. An operational guide to the ISO standards. Centre of Environmental Science, Leiden University, Leiden, The Netherlands.

¹⁵² LEVASSEUR P., LEMAIRE N., 2006. – Etat des lieux du traitement des lisiers de porcs en France. *Techni porc*, 29, n°1, 29-31.

¹⁵³ LOYON L., GUIZIOU F., BELINE F., PEU P., 2007. Gaseous emissions (NH₃, N₂O, CH₄ and CO₂) from the aerobic treatment of piggery slurry – comparison with conventional storage system. *Biosyst. Eng.*, 97, 472-480.

¹⁵⁴ PELLETIER F., GODBOUT S., LAROUCHE J.P., LEMAY S., MARQUIS A., 2006. Ammonia emissions from swine manure storage tank. Technology for Recycling of Manure and Organic Residues in a Whole-Farm Perspective. Vol. II. 12th Ramiran International conference. DIAS report Plant production, 123, 249-252.

autrement et à condition d'une parfaite organisation logistique du plan d'épandage collectif. Le stockage est déterminant pour les émissions gazeuses, d'autant plus que, dans le cas étudié, l'émission à l'épandage était réduite du fait de l'enfouissement du lisier. Substitution effective des engrais et importance des émissions au stockage rendent nécessaire de mieux appréhender la faisabilité du plan d'épandage collectif soumis à différentes contraintes logistiques ou climatiques. Les contraintes testées ont montrées la forte dépendance de la réalisation des épandages aux performances de chantier (nombre de camions, vitesse d'épandage) et aux conditions climatiques, en particulier les pluies en fin d'hiver [Ci28].

Des contraintes de disponibilité du matériel d'épandage, de délai de ressuyage des parcelles qui dépend de leur aptitude à l'épandage (hydromorphie) et de la culture, et d'assolement ont ensuite été simulées avec le modèle COMET, en prenant deux années climatiques contrastées [Ac18]. Le plan d'épandage n'est souvent pas complètement réalisé pour les céréales d'hiver dont l'épandage a lieu en fin d'hiver, en particulier lorsque les sols ont une aptitude à l'épandage réduite ou les années avec une fin d'hiver pluvieuse (2001). Même l'épandage sur maïs au début du printemps peut être affecté en année humide et avec des sols ayant une faible aptitude à l'épandage. Une disponibilité réduite du matériel (3j par semaine au lieu de 5j) affecte grandement les performances, réduisant les réalisations d'apport sur céréales d'hiver à moins de la moitié des prévisions dans les cas défavorables (en année humide et lorsque les sols sont peu portant en année sèche). Le remplacement partiel (10%) de blé par du colza améliore les performances car l'épandage de fin d'hiver, souvent difficile du fait des pluies, est alors reporté en fin d'été où il s'effectue sans difficulté du fait des conditions climatiques favorables [Ci31].

A partir des résultats de COMET concernant l'épandage effectif de lisier et les émissions au stockage (CH_4 et NH_3) et à l'épandage (NH_3) simulés, les différentes ACV réalisées [Ci30, Ac18] montrent la forte variabilité de l'évaluation environnementale par rapport à un scénario moyen initialement évalué (cf. ci-dessus). Concernant les catégories d'impact « Eutrophisation » et « Acidification », tous les résultats obtenus avec les simulations de COMET sont supérieurs au scénario de référence en raison d'une sous-estimation des émissions de NH_3 à l'épandage dans ce scénario moyen qui considère systématiquement un enfouissement profond du lisier, ce qui n'est le cas, dans la réalité et dans les simulations avec COMET, que pour le maïs et le colza. Des variations importantes, de l'ordre de 60% sont constatées entre les différents scénarios simulés en lien avec la quantité de lisier réellement épandue, les catégories d'impact étant rapportées à cette quantité dont nous avons montré qu'elle dépendait beaucoup des conditions d'aptitude des sols, de climat et de disponibilité en matériel. Pour la catégorie d'impact « Changement climatique » ces différences sont encore plus marquées et sont dues majoritairement aux quantités de CH_4 émises au stockage qui dépendent de la durée de celui-ci, elle-même liée aux réalisations effectives des épandages.

L'utilisation des résultats de simulation dans l'ACV relativise la supériorité, de l'épandage par rapport au traitement, constatée précédemment dans le scénario de référence. L'utilisation de coefficients moyens pour les inventaires réalisés dans l'ACV peut ainsi conduire à une évaluation environnementale faussée pour un système ou une pratique donnée, et ce d'autant plus que ces inventaires ne considèrent souvent qu'une seule année donnée (cf. outil EDEN ; Kanyarushoki, 2008)¹⁵⁵. En effet, les conditions climatiques, édaphiques et organisationnelles sont susceptibles d'affecter grandement les facteurs d'émissions considérés. Prenant en compte la variabilité des conditions de réalisation des activités agricoles, la modélisation dynamique enrichit l'évaluation environnementale produite par l'ACV ; elle explique ainsi une part de l'incertitude communément admise dans ce type de méthode (Payraudeau *et al.*, 2007)¹⁵⁶, celle liée à la variabilité des systèmes d'élevage et aux conditions de leur fonctionnement, notamment en rapport avec les contraintes climatiques et logistiques. L'autre part de l'incertitude est liée aux facteurs d'émissions utilisés et aux équations utilisées (cf. § II.3.2.) qui dépendent des connaissances disponibles dans les conditions simulées [Ac18].

Nous avons vu que la variabilité de l'épandage au niveau collectif liée à diverses contraintes des parcelles des prêteurs de terre (aptitude des sols, assolement) et des conditions de chantier (matériel

¹⁵⁵ KANYARUSHOKI C., VAN DER WERF H.M.G., ROGER F., CORSON M., 2008. EDEN : un outil opérationnel pour l'évaluation environnementale des systèmes de production laitiers. ECOTECHS 08 : des éco-indicateurs à l'évaluation et à la certification environnementale, Cemagref, 21-22 octobre 2008, Montoldre (F).

¹⁵⁶ PAYRAUDEAU S., VAN DER WERF H., VERTES F., 2007. Analysis of the uncertainty associated with the estimation of nitrogen losses from farming systems. *Agricultural Systems*, 94, 416-430.

et climat) pouvait être mieux cernée par le modèle COMET pour produire une évaluation environnementale plus pertinente que celle réalisée avec un scénario moyen. Sans aller jusqu'au calcul des indicateurs d'impact de l'ACV, la variabilité entre les exploitations d'élevage (les producteurs de lisier) impliquées dans le plan collectif a aussi été étudiée avec COMET en retenant plusieurs indicateurs d'émissions (Fig. 15) :

- les émissions de NH_3 au stockage (chez les éleveurs) et à l'épandage (chez les éleveurs et chez les prêteurs) qui ont un impact sur l'eutrophisation et sur l'acidification, et de CH_4 au stockage (chez les éleveurs) qui est un gaz à effet de serre ; l'émission de NH_3 au stockage est très dépendante de la configuration des dispositifs de stockage (rapport surface/volume), alors que celle de CH_4 est essentiellement en rapport avec le volume de lisier stocké ;
- les risques de pollution nitrique (NO_3^- conduisant à un impact potentiel « Eutrophisation ») en considérant les débordements des fosses [Cs19], c'est-à-dire l'excédent de lisier qui peut être assimilé à des épandages en surdose ou en dehors des périodes recommandées ;
- le recours nécessaire à des engrais de synthèse (N-engrais) pour compenser le déficit de fertilisation (calculée selon les besoins des cultures) consécutif à l'azote non épandu par le lisier et à celui volatilisé après l'épandage ; ce recours aux engrais a un impact sur les gaz à effet de serre et sur la consommation d'énergie non renouvelable ;
- le temps de travail des équipements qui peut être considéré comme un indicateur de consommation d'énergie non renouvelable.

La figure 15 montre une grande variabilité des valeurs prises (si on considère les valeurs extrêmes) par ces indicateurs selon les élevages car elles dépendent des dispositifs de stockage et des assolements individuels propres à chaque élevage. Par exemple, l'émission de NH_3 à l'épandage dépend de la dose de lisier épandue et de la culture qui conditionne la possibilité d'enfouir le lisier. Cette variabilité est plus faible dans le cas des prêteurs de terre. La variabilité interannuelle semble par contre peu importante, mais deux années seulement, bien que contrastées, ont été considérées dans cette étude.

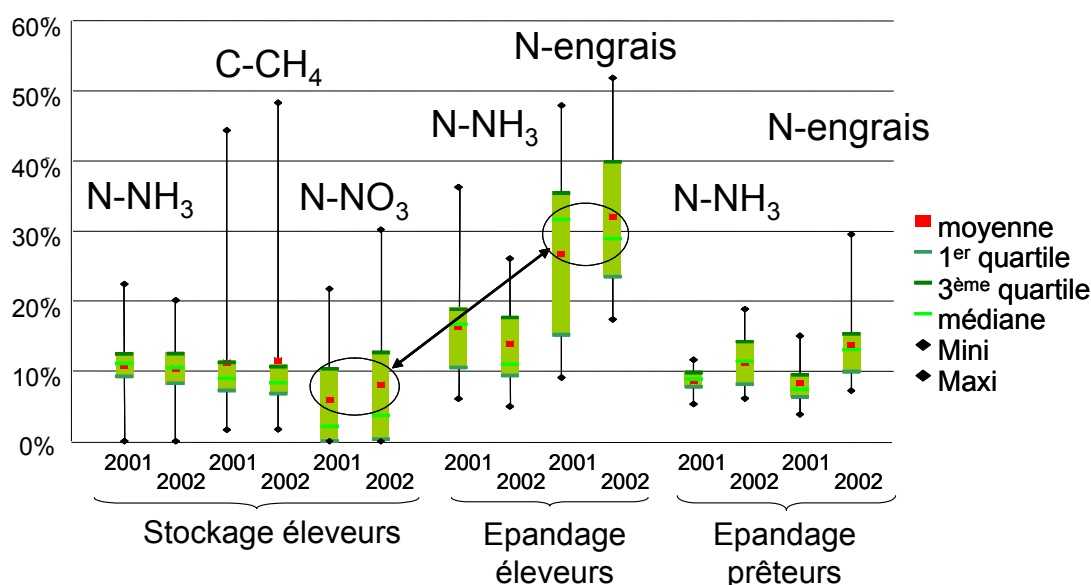


Figure 15. Facteurs d'émissions au stockage et à l'épandage (en % des quantités initiales produites) pour les exploitations d'élevage (n=11) et les prêteurs de terre (n=11) ; l'indicateur N-NO₃ correspond à un risque de pollution (N en excès) et l'indicateur N-engrais considère l'achat d'engrais nécessaire pour compenser le besoin des cultures non pourvu par le lisier [Cs19].

Différentes solutions techniques ou organisationnelles ont été testées avec le modèle COMET pour réduire les impacts environnementaux. Adapter la taille des dispositifs de stockage et des capacités d'épandage de façon différenciée selon la structure de chaque exploitation permet surtout de réduire

fortement le risque de « débordement » (diminution du facteur d'émission N perdu/N produit de 15% à moins de 5% en moyenne) donc d'excès potentiel d'apport sur les parcelles (risque NO_3^-). Les émissions au stockage (CH_4 et NH_3) et à l'épandage (NH_3) sont peu modifiées, le recours aux engrais de synthèse est légèrement diminué. Couvrir les fosses réduit fortement l'émission d'ammoniac au stockage (de 10 à 4% de l'azote produit) et en conséquence le recours aux engrais chez les éleveurs et les prêteurs, mais l'émission de CH_4 est un peu augmentée (de 10 à 14% du carbone produit) du fait d'une durée de stockage accrue. Les émissions d'ammoniac à l'épandage sont peu modifiées malgré un lisier plus riche. Du fait de l'augmentation de la teneur en azote du lisier, les quantités livrées et, donc, les durées de livraison sont fortement diminuées (de 30%), contribuant ainsi à une réduction d'énergie non renouvelable consommée et de GES émis par le transport. Le temps d'épandage est également diminué mais dans une moindre mesure. Réduire la dilution du lisier (économie d'eau au lavage et pour l'abreuvement) conduit principalement à une réduction du recours aux engrais et des temps d'épandage et de livraison.

La logistique du plan d'épandage collectif est déterminante sur les épandages individuels. Si le nombre de camions de livraison est réduit (par exemple de 6 à 4 semi-remorques de 25 m³), le risque NO_3^- est doublé et le recours aux engrais augmenté de 80%. Des aléas modérés sur les livraisons (perturbation de la disponibilité des camions) ont assez peu d'incidence. Donner de la souplesse aux règles d'apport du plan d'épandage collectif, par exemple en autorisant les éleveurs fortement contraints par leur capacité de stockage ou leur assolement à utiliser le lisier de porcs charcutiers simultanément à la réalisation de leur engagement collectif (*i.e.* leur contrat de livraison avec le GIE), permet de réduire le risque NO_3^- et le recours aux engrais. Ces règles assouplies permettent de compenser en partie le manque éventuel de matériel de transport.

La principale conclusion de ces études sur la variabilité des impacts et sur les solutions permettant de les réduire est la nécessaire adaptation, au cas par cas, des équipements aux plans de fertilisation.

Regard critique

Contrairement à ce que nous avons constaté avec les simulations du modèle COMET pour deux années contrastées (Fig. 15) [Cs19], Xavier Chardon, dans sa thèse [Tt4], montre une très forte hétérogénéité interannuelle pour un système d'élevage donné, considérant un cas type « moyen » simulé avec le modèle MELODIE, notamment pour les flux de nitrate vers l'environnement simulés avec le modèle STICS. On peut dire que les deux informations fournies par l'utilisation des modèles COMET et MELODIE se complètent dans le sens où l'analyse de la variabilité se situait à des niveaux d'organisation différents (exploitation individuelle dans le cas de MELODIE vs groupe d'exploitations dans COMET). Toutes deux concourent à affirmer que la variabilité liée aux structures d'élevage et aux pratiques est très grande. Dès lors, comparer des systèmes d'élevage en utilisant l'évaluation environnementale multicritères (par exemple l'ACV) en considérant des émissions moyennes et à partir de données d'enquêtes recueillies sur une seule année (Kanyarushoki, 2008, *op. cit.*) paraît délicat et sujet à discussion. Les ACV ne devraient dès lors être raisonnablement réalisées que pour étudier l'amélioration de certains critères clés pour un système donné, en veillant à ne pas détériorer les autres critères. Ainsi, les ACV restent utiles et nécessaires pour appréhender correctement les effets multiples des pratiques ou stratégies d'élevage.

Ce travail a mis en évidence la complémentarité des approches par bilan statique (type ACV) avec la simulation dynamique. Il a mis l'accent sur l'intérêt d'articuler différents outils de modélisation et d'analyse. Il pointe aussi la nécessité de prendre en compte le territoire, et les liens entre agriculteurs (cf. projet BIOMAS, § III.2.2.), pour concourir à une évaluation environnementale de la gestion des effluents d'élevage qui soit la plus pertinente possible. Les réflexions sur cette articulation entre simulation dynamique et évaluation environnementale multicritères doivent donc être poursuivies (cf. § III.2.3.).

Au-delà de ces approches contribuant à l'analyse environnementale des systèmes d'élevage au niveau d'un territoire, il est apparu, en marge de ces travaux, que les facteurs sociaux restaient déterminants. En effet, malgré l'intérêt montré de l'organisation de plans d'épandage collectifs permettant une plus grande substitution d'engrais de synthèse, l'épandage de lisier de porcs reste socialement très mal accepté pour les nuisances qu'il occasionne, notamment les odeurs et les transports. Des doutes sont également émis par les associations de défense de l'environnement concernant la fiabilité des

propositions faite par la profession agricole. Malgré le contexte souvent difficile, comme c'est le cas en Bretagne, des démarches participatives pour aboutir à des solutions concertées à une échelle territoriale et pertinentes sur les plans économique, agronomique, environnemental et social seraient à développer.

Dans ce sens, concevoir et développer des méthodes d'analyse ou d'évaluation (dans ses 3 composantes) des systèmes de production animale à l'échelle du territoire est un enjeu que le réseau mixte technologique « Elevage et environnement » tente de prendre en compte. A sa demande, j'ai animé de 2008 à 2010 un groupe de réflexion méthodologique autour de ce thème. Cette étude prospective a considéré deux parties principales :

1- la synthèse des connaissances, des manques et des besoins concernant l'évaluation des systèmes de production animale à l'échelle du territoire ;

2- la proposition de méthodes :

2.1) pour aborder la question de la complémentarité ou de la compétition des exploitations et des activités existantes sur l'utilisation de ressources et la mobilisation de la production, sur la diminution des émissions gazeuses, sur la biodiversité, sur le paysage, sur l'occupation de l'espace ;

2.2) pour identifier les freins et leviers d'action qui permettent de modifier l'organisation du territoire actuel afin de la faire évoluer en fonction d'objectifs divers.

Une synthèse bibliographique [Tm20] réalisée par des étudiants de l'ESA d'Angers, que j'ai encadrés, a montré qu'il n'existait pas, à proprement parlé, de telle méthode. Beaucoup de travaux concernent soit l'exploitation agricole ou une échelle macro (régionale, nationale), le niveau méso du territoire vu comme un espace de liens et d'interactions à propos de la gestion de ressources, est peu considéré. Face à ce manque et partant de projets réalisés ou en cours s'intéressant à ce niveau d'organisation, j'ai encadré un second travail effectué par un étudiant d'Agrocampus Ouest qui a permis de mieux définir ce que pourrait être une méthode d'évaluation multicritères des SPA à l'échelle d'un territoire [Tm21] en proposant des indicateurs couvrant une appréciation de la prise en compte de la démarche (participative ou non), du territoire (niveau d'organisation) et de la durabilité (3 composantes). Enfin, sur la base des travaux précédents, une ébauche de projet a été réalisée [Tm22] pour identifier les questions, proposer des territoires « atelier » et cerner des équipes de recherche et de développement intéressées. Ce projet, proposé par Claver Kanyarushoki qui a repris l'animation autour de ce thème depuis mon départ de Rennes et auquel je participerai pour les aspects méthodologiques, est en cours de soumission à l'appel à proposition CASDAR¹⁵⁷ du Ministère de l'Agriculture et de la Pêche.

D'autre part, le projet GIROVAR « Gestion Intégrée des Résidus Organiques par la Valorisation Agronomique à la Réunion », financé par le ministère de l'agriculture dans le cadre du programme CASDAR 2010, devrait également permettre une avancée méthodologique significative dans le domaine de l'évaluation et de la prise en compte du territoire. Ce projet, coordonné par Tom Wassenaar, collègue de l'UPR Recyclage et risque du CIRAD spécialisé en évaluation environnementale, et auquel François Guerrin et moi participons, sera conduit de 2011 à 2013 sur le territoire de la côte ouest de l'île de la Réunion. L'objectif est de construire collectivement, en impliquant tous les acteurs concernés du territoire et en partant des besoins en fertilisants et amendements organiques, des scénarios de valorisation des produits résiduels organiques, aussi bien des déchets d'origine agricole qu'urbaine, puis d'évaluer ces scénarios en considérant les trois composantes économique, environnementale et sociale du développement durable (Boiffin *et al.*, 2004, *op. cit.*). Ce projet, qui s'adresse explicitement au niveau du territoire en considérant d'autres flux que les effluents d'élevage et d'autres acteurs (y compris les politiques), ainsi que le projet ISARD, bénéficieront de nos acquis en matières d'enquêtes, de construction de typologie, de modélisation, de démarche de simulation et d'évaluation environnementale, ce que nous avons résumé dans la démarche MAFATE (Fig.12, p. 70) [Oc10]. Ainsi, ces projets (cf. § III.3.) nous donnent les moyens de poursuivre nos travaux pour tenter de répondre aux questions posées tout au long de cette partie 3 « Modélisation de la gestion des flux de matières aux niveaux de l'exploitation d'élevage et du territoire et évaluation environnementale » du mémoire des travaux de recherche.

¹⁵⁷ Compte d'affectation spécial pour le développement agricole et rural

III. Perspectives de recherche

III.1. Problématique et objectifs de recherche

Le développement des filières agro-alimentaires est générateur de richesses mais peut induire de profonds déséquilibres en matière de développement agricole et d'aménagement du territoire. La correction de ces déséquilibres justifie des actions de développement et des programmes de recherche sur l'agriculture durable (Landais, 1998, *op. cit.*). Au delà de cette nécessité de promouvoir une agriculture en rupture avec les modèles productivistes, il est nécessaire d'analyser comment l'agriculture s'insère dans le développement durable (Boiffin *et al.*, *op. cit.*). Face aux dynamiques de changement perceptibles, l'analyse de la durabilité des systèmes de production agricole, sous ses aspects économiques, sociaux et environnementaux, prend de plus en plus d'importance. Ainsi, on note une demande croissante pour des recherches plus intégratives et mobilisant de nouvelles méthodologies (Thornton and Herrero, 2001, *op. cit.*). Dans la continuité des travaux conduits durant ces 10 dernières années, notamment dans le domaine de la simulation des pratiques et des flux au niveau des systèmes de production agricole (Guerrin, 2007, *op. cit.*), les perspectives de recherche que je propose se positionnent clairement dans ce contexte. Elles s'orientent préférentiellement vers l'évaluation agronomique et environnementale vue comme un moyen pour améliorer l'efficacité des systèmes de production agricole. Cependant, le cadre méthodologique de cette analyse doit permettre d'intégrer les autres composantes de la durabilité portées par les sciences sociales.

Les problèmes environnementaux créés par les systèmes d'élevage intensif sont, en majeure partie, liés à la gestion des intrants. Cette problématique identifiable pour les systèmes d'élevage peut s'appliquer au recyclage des déchets au niveau d'un territoire, avec la nécessité d'organiser des flux entre unités productrices et consommatrices, ce qui tend à améliorer l'efficacité globale du système mais peut également conduire à des impacts sur l'environnement. Parmi les flux d'éléments générés par cette gestion, certains sont déterminés par les processus biophysiques et d'autres sont sous l'action des agriculteurs [R48] (Fig. 1, p. 36). Ainsi, les méthodes d'évaluation environnementale proposent deux approches (Payraudeau et Van der Werf, 2005, *op.cit.*) l'une orientée vers les impacts sur le milieu et l'autre vers les pratiques des agriculteurs. La première est une approche de bilan qui comptabilise les impacts et les apprécie simultanément, comme le propose la méthode de l'ACV (Van der Werf et Petit, 2002)¹⁵⁸. La seconde implique de s'intéresser aux interactions entre les pratiques et les processus biophysiques générant des flux variables dans le temps et l'espace car ils sont soumis à des aléas (principalement le climat). En fait, pour étudier les risques liés aux activités d'élevage ou de recyclage des déchets, un compromis entre ces deux approches doit être recherché : prendre en compte la sensibilité du milieu récepteur aux flux de polluants et prendre en compte l'aléa à travers l'interaction entre des pratiques et le climat. D'autre part, pour être opérationnelle, l'évaluation de la durabilité doit s'adresser à des acteurs clairement identifiés. Par exemple, si l'évaluation vise un conseil de gestion auprès de conseillers et d'agriculteurs, elle devra être proche des pratiques, l'objectif étant de les améliorer ; ceci vaut aussi bien pour les impacts locaux que globaux, mais s'intéresser à l'amélioration des pratiques met davantage l'accent sur les impacts directs par rapport aux impacts indirects. Autre exemple, si l'évaluation vise la décision publique à un niveau régional, elle devra être proche des impacts avec des indicateurs les plus agrégés possible en ne considérant que les pratiques moyennes, standard, des agriculteurs ; ces indicateurs doivent permettre la décision sur un compromis acceptable ; ceci n'empêche pas pour autant de viser l'amélioration des pratiques par le biais d'incitations (taxes, subventions, communication) visant à modifier les modes de production.

Parmi les méthodes d'évaluation environnementale, l'ACV présente l'intérêt d'une évaluation complète d'une activité de production, de l'amont à l'aval, et de prendre en compte différentes catégories d'impacts (Van der Werf et Petit, 2002, *op. cit.*). Cependant, la dynamique des processus de production n'est pas prise en compte, de même que l'interaction spatiale entre activités, par exemple entre

¹⁵⁸ VAN DER WERF H.M.G., PETIT J., 2002. Evaluation of the environmental impact of agriculture at the farm level : a comparison and analysis of 12 indicator-based methods. *Agriculture, Ecosystems and Environment*: 93 (1), p.131-145.

exploitations agricoles (Payraudeau et Van der Werf, 2005, *op. cit.*). Par ailleurs, les modèles dynamiques, construits pour simuler les flux de matière aux niveaux de l'exploitation agricole ou d'un ensemble d'exploitations [O2], ne considèrent pas tous les polluants (Jarvis *et al.*, 1996)¹⁵⁹ et se limitent souvent à une partie du système de production (Guerrin, 2001, *op. cit.* ; [Ai4, Ci28]). Ces modèles ne permettent pas une évaluation environnementale complète ; des risques de reports d'impacts existent donc lorsqu'on les utilise pour améliorer certaines pratiques indépendamment des autres (Vayssières *et al.*, 2009, *op. cit.*). En outre, les déterminants sociaux et économiques sont souvent primordiaux dans la prise de décision par les acteurs [Ac18]. Il est donc nécessaire de développer des méthodes permettant 1) de coupler la modélisation des processus biophysiques et celle des activités de gestion, 2) d'articuler la simulation dynamique des systèmes de production agricole à l'évaluation environnementale multicritères et 3) de mettre en œuvre une démarche intégrée d'analyse agronomique, environnementale, économique et sociale. Sans prétendre être exhaustif, ces méthodes concernent l'analyse systémique des systèmes, l'acquisition de référentiel adapté, le choix des processus biophysiques et de gestion à représenter, la simplification des représentations, la construction de scénarios à simuler, l'organisation des simulations et la traçabilité des résultats, la construction d'indicateurs d'évaluation, l'analyse multicritères.

Mon premier objectif de recherche est de contribuer à l'élaboration de telles méthodes d'évaluations multicritères des systèmes de production agricole, compris comme l'exploitation agricole ou un ensemble d'exploitations en interaction contribuant, directement ou indirectement, à la production agricole. Cet objectif de recherche se positionne donc en continuité des travaux menés sur la modélisation de la gestion des effluents d'élevage [O2] (cf. § II.3.1.), de ceux sur la modélisation des flux de polluants au niveau de l'exploitation d'élevage [Ai11, Ai12, Ci32] (cf. § II.3.2.) et de ceux conduits sur l'évaluation environnementale des exploitations (Basset et Van der Werf, 2005, *op. cit.*) ou de techniques d'élevage [Ai8, Ai12, Ac18] (cf. § II.3.3.).

Mon second objectif est de poursuivre l'acquisition de connaissances sur les pertes d'éléments vers l'atmosphère afin d'améliorer l'efficacité des systèmes d'élevage ou de recyclage des déchets. En effet, le manque de références concernant ces processus en général, mais surtout en contexte tropical, rend pertinent, pour moi, de poursuivre et d'étendre les travaux conduits sur la modélisation des émissions gazeuses lors du compostage des effluents d'élevage [Ai3, Ai6, Ai16, Ci36] (cf. § II.2.2.4.). Suivant la démarche déjà initiée avec les thèses de Jonathan Vayssières [Tt3] et Cyrille Rigolot [Tt5], ces connaissances sur les facteurs d'émissions seront autant que possible intégrées dans des modèles de gestion et devraient permettre ainsi la réalisation d'évaluations environnementales plus pertinentes.

Les travaux que j'ai conduits durant une vingtaine d'année se caractérisent par des allers retours fréquents entre l'approche analytique et l'approche systémique. Ces deux approches se sont avérées très complémentaires dans les travaux de modélisation réalisés plus récemment en collaboration avec des collègues modélisateurs et informaticiens. Mes travaux se caractérisent également par le choix de l'interface entre production animale et production végétale comme objet d'étude. Les perspectives de recherche que j'envisage pour répondre à ces objectifs sont dans la poursuite de ce positionnement avec, néanmoins, un élargissement vers la relation agriculture-environnement, considérant les services écosystémiques rendus par l'agriculture. En effet, l'objet de mes recherches, que je partage avec mes collègues de l'unité Recyclage et risque du CIRAD, ne concerne plus exclusivement la production animale et son interaction avec la production végétale mais, également, le recyclage agronomique des déchets ou produits résiduels organiques (PRO), qu'ils soient d'origine animale, urbaine ou agro-industrielle.

III.2. Thèmes de recherche envisagés

Pour répondre aux objectifs déclinés ci-dessus, les thèmes que je propose de traiter, dans de mon unité de recherche, concernent toujours la combinaison d'approches systémiques (§ III.2.1. à III.2.4.) et analytiques (§ III.2.5. et III.2.6.), les deux permettant de contribuer à la simulation de systèmes de recyclage pour prédire leurs impacts, en évaluer les conséquences notamment environnementales et concevoir des alternatives. Pour ce qui me concerne directement, la continuité des recherches

¹⁵⁹ JARVIS S.C., WILKINS R.J., PAIN B.F.M., 1996. Opportunities for reducing the environmental impact of dairy farming managements: a systems approach. Grass and Forage Science, 51, 21-31.

concernera également l'objet d'étude que représente l'interface entre la production de PRO, en premier lieu ceux générés par les activités d'élevage et l'agriculture.

III.2.1. Couplage entre règles de gestion et modèles biophysiques simplifiés

Dans le but d'élaborer des méthodes d'évaluation des systèmes de gestion des PRO aux niveaux de l'exploitation agricole ou d'un territoire, l'objectif de cette action de recherche est de coupler la modélisation dynamique de la gestion à celle des systèmes biophysiques. Il s'agit donc de représenter, dans un même modèle, les décisions des agriculteurs aboutissant aux actions techniques et les connaissances sur les systèmes biophysiques, notamment celles concernant les flux d'éléments polluants. Cette intégration implique l'identification de variables d'interface entre composantes biophysiques et décisionnelles des modèles. Les variables de sortie du modèle intégré sont des indicateurs agronomiques (production, intrants, stocks) et environnementaux (flux de polluants vers l'eau, l'air et l'atmosphère, statut des sols, énergie consommée).

Ce travail a déjà été ébauché dans plusieurs modèles de dimensionnement, de pilotage et de suivi de systèmes de culture utilisant des effluents issus d'élevages ou d'agro-industries auxquels j'ai contribué : GAMEDE, qui simule les actions de gestion de la production fourragère et des animaux au sein de l'exploitation laitière ainsi que la modélisation des flux d'azote vers l'environnement ; COMET, qui simule la gestion collective des effluents d'élevage au niveau du territoire et les émissions gazeuses consécutives. Cette implémentation conjointe au sein d'un modèle suggère de rechercher la bonne granularité de représentation (Barreteau & Treuil, 2009, *op. cit.*) pour représenter de façon simplifiée les processus biophysiques (ex., par couplage avec des modèles existants) et leur conséquences (ex., par des tables de valeurs ou la catégorisation grossière des effets des pratiques). On s'interrogera également sur la nécessité, soit du couplage informatique des modèles, nécessaire en cas de bouclage des processus (les sorties de chacun des modèles modifiant dynamiquement les entrées de l'autre), soit de leurs utilisations successives découplées, les valeurs de sortie du modèle de gestion servant, « hors-ligne », au paramétrage d'entrée des modèles biophysiques requis pour l'évaluation des performances agronomiques et environnementales (Guerrin, 2007, *op. cit.*).

Ce travail sera poursuivi en collaboration avec François Guerrin, notamment dans le cadre de la tâche 3 du projet ISARD décrit ci-après (cf. § III.3.). Comme l'ont montré nos expériences passées, la modélisation conceptuelle [Ai4] des systèmes de recyclage que nous voulons représenter est un préalable à toute implémentation informatique. Le couplage des processus biophysiques peut être réalisé de différentes façons : avec un modèle biophysique adapté et paramétrable dans le contexte retenu, en utilisant certaines fonctions issues de ce modèle ou plus généralement de la littérature, en utilisant un référentiel de données. Il s'agit donc avant tout d'un choix de degré de précision dépendant des outils, connaissances et données disponibles, et des objectifs assignés aux modèles. Les quatre terrains contrastés du projet ISARD, avec une grande variété de types de données disponibles et différentes problématiques de gestion, nous donnent l'opportunité de mettre au point et tester la démarche.

III.2.2. Méthodologie de simulation avec les modèles de gestion des PRO

Les modèles de gestion développés dans l'unité (Guerrin, 2001, 2004, *op. cit.*) [Ci28, Ci30, Ci31, Ac18] doivent permettre de simuler différentes stratégies de gestion des PRO, soumises à des aléas climatiques, techniques ou organisationnels. Ces simulations sont réalisées sur des périodes clés (saison, période critique, durée d'une opération, une ou plusieurs années, etc.), à définir selon les systèmes, les indicateurs et le type d'évaluation considérés.

L'objectif de recherche est ici de construire une méthodologie de simulation qui considère la construction des scénarios à simuler, le paramétrage des modèles et l'organisation des simulations comme un processus progressif (modifications des règles pas à pas) et/ou itératif. Le recours à des plans d'expérience (cf. approches du réseau MEXICO, *op. cit.*) pour couvrir une large gamme de situations est une voie à explorer. Les résultats des simulations pouvant ensuite être utilisés pour l'évaluation environnementale (par ex. avec la méthode de l'analyse de cycle de vie comme nous l'avons montré avec le modèle COMET), l'analyse statistique (fréquentielle, multifactorielle) peut être utilisée pour décrire la variabilité des résultats des simulations (cf. approches du réseau MEXICO, *op.*

cit.) : analyse de sensibilité, introduction de variables aléatoires ... Des procédures automatisées de calcul des indicateurs permettant de réaliser une ACV à partir des données des simulations (plutôt que les valeurs de « référence », issues de bases de données internationales, qui sont classiquement utilisées à défaut) pourront être mises en place.

La spatialisation des objets modélisés (parcelles, élevages, etc.) est également à envisager (Hervé & Castella, 2009)¹⁶⁰. Celle-ci est en particulier possible avec les SMA (à condition d'avoir un référentiel cartographique couplé) et a pu être expérimentée dans l'unité avec le modèle BIOMAS qui permet, d'une part, d'analyser des transactions entre agents et, d'autre part, de quantifier et visualiser des indicateurs environnementaux (par ex. gradients de couleurs permettant de définir des classes d'états). L'utilisation du modèle BIOMAS sur le territoire du Petit et Grand Tampon sera poursuivie. Ce modèle, développé par le LIM¹⁶¹ au cours des 10 dernières années avec l'intervention de nombreux stagiaires M1 et M2 en informatique et qui a servi de support à plusieurs thèses en informatique (Soulié, 2001 ; Andriamasinoro, 2003 ; Ralambondrainy, 2009)¹⁶², a posé des difficultés qui ont retardé son utilisation possible par des agronomes : accessibilité du paramétrage à l'utilisateur, sauvegarde du paramétrage dans la base de données, extraction des résultats, calculs de cohérence. Ces difficultés ont été résolues progressivement par les étudiants mobilisés notamment dans le cadre de stages, en relation avec Jean-Michel Médoc. La collaboration autour du modèle BIOMAS a été reprise en 2009 [Tm19] et sera poursuivie pour achever le travail de simulation sur le cas étudié et formaliser la démarche de simulation correspondante.

Les autres modèles utilisés ou développés dans le cadre des projets ISARD en 2011 avec la diversité des terrains concernés et GIROVAR en 2012 sur le territoire des communes de l'ouest de la Réunion devraient permettre également une avancée sur cette thématique.

III.2.3. Articulation avec les approches statiques d'évaluation

La modélisation dynamique permet de rendre compte d'une grande variabilité de situations, dépendant de la nature des systèmes, des pratiques mises en œuvre (actions simulées) et de l'influence spatiale (par ex. positionnement des parcelles) et temporelle (par ex. années climatiques). Les méthodes statiques d'évaluation multicritères agrègent quant à elles de nombreuses données issues de multiples sources de références. Il s'agit donc de produire à partir des modèles dynamiques des données analysées et résumées compatibles, permettant de prendre en compte une partie de l'incertitude habituellement ignorée par ces méthodes multicritères. Cette incertitude expliquée correspond à celle qui peut être modifiable par le choix d'un système, une modification de pratiques ou simplement celle correspondant à la variabilité climatique ; l'autre part de l'incertitude est due à l'estimation des facteurs d'émissions et des impacts, dont la réduction dépend de l'avancée des connaissances dans le domaine biophysique. Il y a aussi une imprécision sur les valeurs de certains paramètres dont ne tient pas compte l'ACV classique.

Le travail réalisé avec le modèle COMET dans le cadre du projet SPADD a produit des résultats, partiellement publiés, montrant notamment la grande variabilité des réponses environnementales concernant pourtant une situation relativement simple de gestion d'un seul PRO, le lisier de porc. On peut ainsi dire que cette articulation a déjà fait l'objet d'investigations dans le cadre des travaux que j'ai pu encadrer (thèse de Cyrille Rigolot [Tt5], post-doctorat de Santiago Lopez-Ridaura [Ci28, Ci30]). Elle demande cependant à être amplifiée par une collaboration accrue avec Tom Wassenaar, chercheur en évaluation environnementale nouvellement recruté dans l'unité Recyclage et risque. Les travaux d'évaluation agronomique et environnementale de scénarios de gestion territoriale de PRO, prévus dans la tâche 4 du projet GIROVAR mentionné ci-après (cf. § III.3.), pourront ainsi constituer un cadre très propice pour poursuivre cette mise au point méthodologique.

¹⁶⁰ HERVE D., CASTELLA J.-C., 2009. Espaces, temps, acteurs : regards d'agronomes. In : Modélisation de l'environnement : entre natures et sociétés, D. Hervé & F. Laloë (Ed.), Ed. Quae, NSS-dialogues, p. 93-111.

¹⁶¹ Laboratoire d'Informatique et de Mathématiques (ex IREMA, Institut de Recherche en Mathématiques et Informatique appliquées), université de la Réunion.

¹⁶² SOULIE J.-C., 2001. Vers une approche multi-environnements pour les agents. Thèse de doctorat, Université de la Réunion.

ANDRIAMASINORO F., 2003. Proposition d'un modèle d'agents hybrides basé sur la motivation naturelle. Thèse de doctorat, Université de la Réunion.

RALAMBONDRAINY T., 2009. Observation de simulations multi-agents à grande échelle. Thèse de doctorat, Université de la Réunion.

III.2.4. Validation des modèles par l'usage

L'objectif de recherche est de formaliser l'utilisation des modèles en simulant des cas types et des situations de gestion réelles, en interaction avec les professionnels de l'agriculture. Dans les projets déjà réalisés (Porcherie Verte, SPA/DD), des tentatives d'utilisation des modèles avec les acteurs ont rencontré quelques difficultés pour différentes raisons : non pérennité des collectifs d'éleveurs, préoccupations autres des acteurs, mauvaise préparation des situations à simuler ou logiciel peu fiable. Dans les travaux que j'ai pu suivre, le cas le plus abouti en matière de « modélisation participative » est celui de GAMEDE, modèle co-construit avec des éleveurs pour simuler leurs propres exploitations, la généralité du modèle provenant de son adaptation aux 6 exploitations types couvrant les différentes manières de produire du lait à la Réunion. Cependant, les simulations n'ont pas été réalisées en présence des éleveurs, seuls les résultats des simulations ont été partiellement analysés avec eux.

Du fait de ces expériences insuffisamment abouties, la nécessité de la validation des modèles demeure une question posée. Une validation de la construction est possible, soit par des experts ou, directement, par les acteurs (cas de la co-construction). La validation par comparaison au réel paraît très difficile, hormis partiellement pour quelques éléments précis du modèle, en raison de la complexité des systèmes modélisés et de la difficulté à les observer (ou les mesurer) sur de longues périodes. La validation par l'usage des modèles en tant qu'outils d'aide à la décision des acteurs agricoles (Bousquet *et al.*, 2009 ; Laloë & Chaboud, 2009)¹⁶³ demeure donc une ambition des travaux qui pourraient être conduits dans l'unité Recyclage et risque. On gardera ici à l'esprit que valider un modèle, c'est vérifier son adéquation aux objectifs pour lesquels il a été conçu (Rykiel, 1996, *op. cit.*). Ainsi la validation par l'usage avec des acteurs ne se justifie que dans la mesure où on destine ces modèles à leur servir d'outils d'aide à la gestion.

Pour traiter cette question, un partenariat plus étroit doit être établi avec des équipes dont c'est un des objets principaux de recherche (cf. démarche COMOD)¹⁶⁴. C'est, de fait, ce qui est recherché dans le projet GIROVAR, coordonné par mon collègue Tom Wassenaar. Dans ce projet, ce sont les scénarios de gestion territoriale des PRO qui sont visés par l'approche participative conduite par Jérôme Queste, sociologue de l'unité de recherche GREEN¹⁶⁵ du CIRAD. Les modèles et les référentiels scientifiques produits par les agronomes, les technologues et les spécialistes en sciences de l'environnement pour simuler les contraintes logistiques de cette gestion et les impacts agronomiques et environnementaux serviront à alimenter cette démarche de co-construction de scénarios selon des modalités que l'on devra alors définir.

III.2.5. Modélisation des émissions gazeuses et des caractéristiques des coproduits lors de la transformation des PRO

La transformation des PRO crée des possibilités d'innovations agronomiques (nouveaux produits et/ou itinéraires techniques) et organisationnelles (collecte, distribution, réglementation). Parmi les procédés de transformation, le compostage a pour le moment constitué l'essentiel des travaux que j'ai conduits en collaboration avec Paul Robin et Mélynda Hassouna de l'UMR SAS. S'appuyant sur la quantification des bilans matières et des émissions gazeuses dans différentes situations contrastées de compostage [Ai3, Ai6, Ai16], l'objectif des recherches est de développer une approche générique qui permette de modéliser les processus, à partir de la connaissance de quelques paramètres caractérisant, de manière robuste, les matières mises à composter et les conditions de fermentation. Cela doit permettre de prédire (i) les durées de chantier, (ii) les émissions gazeuses et autres pertes d'éléments posant des problèmes pour l'environnement et (iii) les caractéristiques du compost final, notamment concernant la concentration en certains éléments et les dynamiques de libération des nutriments. Cette modélisation dynamique des transformations des matières organiques permettant de simuler les principaux

¹⁶³ BOUSQUET *et al.* (collectif COMOD), 2009. La posture d'accompagnement des processus de prise de décision : les références et les questions transdisciplinaires. In : Modélisation de l'environnement : entre natures et sociétés, D. Hervé & F. Laloë (Ed.), Ed. Quae, NSS-dialogues, p. 71-89.

LALOE F., CHABOUD C., 2009. Aide à la décision, expertise et action. In : Modélisation de l'environnement : entre natures et sociétés, D. Hervé & F. Laloë (Ed.), Ed. Quae, NSS-dialogues, p. 165-177.

¹⁶⁴ Collectif COMOD : Companion Modelling

ANTONA M., D'AQUINO P., AUBERT S., BARRETEAU O., BOISSAU S., BOUSQUET F., DARE W., ÉTIENNE M., LE PAGE C., MATHEVET R., TREBUIL G., WEBER J., 2005. La modélisation comme outil d'accompagnement. Natures Sciences Sociétés 13, 165-168.

¹⁶⁵ Gestion des ressources renouvelables et environnement

processus sera reliée à des caractéristiques spectrales de quelques paramètres critiques pour la maîtrise des procédés. Après validation dans les conditions tempérées et tropicales, les modèles de transformation seront utilisés pour simuler différentes situations afin d'estimer les pertes vers l'atmosphère et préciser l'usage possible des coproduits obtenus.

Suivant cette problématique de recherche, les objectifs du travail de Didier Oudart dans le cadre de la thèse CIFRE financée par Crête d'Or Entreprise démarrée fin 2009, sont plus spécifiquement de :

1. modéliser conceptuellement le procédé de compostage en distinguant différents compartiments de la matière (ex. solide stable/labile, liquide, gaz) et en caractérisant les principaux flux pilotés par des facteurs facilement accessibles (en partant de la modélisation empirique déjà réalisée [Ai16, Ci36]) ;
2. construire un simulateur et le calibrer avec les données acquises en mésocosmes (halle expérimentale de l'UMR SAS), puis le valider sur d'autres données acquises séparément ;
3. acquérir des données sur les émissions gazeuses et sur les PRO en cours de compostage en contexte tropical ; évaluer le modèle dans ce contexte ;
4. utiliser le modèle pour optimiser différentes situations de compostage en conditions tropicales et tempérées, en prédisant les caractéristiques finales des composts, les pertes par lixiviation et les transferts vers l'atmosphère.

Tout en poursuivant les points 1 et 2 de modélisation conceptuelle et informatique sur la plateforme de modélisation Vensim®, la phase expérimentale (point 3), qui permettra un meilleur paramétrage du modèle et une adaptation aux objectifs de l'industriel, vient de débuter en 2011 à la Réunion.

La démarche adoptée pour le compostage reste vraisemblablement valide pour d'autres types de transformations telles que la méthanisation : à la demande de la Région Réunion, un projet spécifique sera élaboré dans le cadre du projet PILMO 5 en 2012 (cf. § III.3.). Plus globalement, à l'échelle d'un territoire, on recherchera une complémentarité entre ces deux procédés, selon les produits à transformer et les valorisations agronomique (effet engrais ou amendement par exemple) ou énergétique (le cas échéant) recherchées. Ce point de vue de la recherche de complémentarité entre différents procédés de transformation est celui que nous adoptons dans le cadre du projet GIROVAR.

III.2.6. Quantification des émissions gazeuses lors de la gestion hors sol des PRO

Partant des travaux réalisés en conditions tempérées pour quantifier les émissions gazeuses dans la filière de gestion des PRO, de leur production (par ex. bâtiment d'élevage) à leur utilisation (par ex. épandage au champ), l'objectif de cette recherche est de développer des méthodes simplifiées pour estimer les transferts vers l'atmosphère afin de les réduire. Ces transferts, dont une grande majorité intervient lors de la manipulation des PRO, concernent des molécules polluantes (NH_3 , N_2O , CH_4) ou constituent des pertes en C ou N pour les systèmes agricoles. Peu de recherches ont été conduites dans les contextes tropicaux, dont on pressent la forte réactivité (température élevée, faible capacité technique des exploitations agricoles pour contenir les pertes). Par ailleurs, les méthodes d'évaluation environnementale multicritères (comme l'ACV) ont recours à des bases de données internationales pour quantifier les flux vers l'atmosphère à partir de facteurs d'émissions. Adapter ces facteurs dans le contexte tropical de gestion des PRO apparaît déterminant pour produire une évaluation agronomique et environnementale pertinente.

Les travaux sur le compostage présentés ci-dessus pourront fournir un cadre méthodologique à cette recherche. Des mesures seront réalisées à la Réunion courant 2011 dans le cadre de la thèse de Didier Oudart avec du matériel (analyseur de gaz photo acoustique 1312 Innova, Skordsborgvej 307, Naerum DK-2850) prêté par l'UMR SAS et l'appui scientifique et technique de Paul Robin et Mélynda Hassouna. Par la suite, il serait intéressant d'acquérir ce type d'instrumentation au CIRAD à La Réunion de manière à étendre la mise au point de méthodes simplifiées aux installations d'élevage ou de traitement et conditionnement de déchets organiques. Ces mesures pourront également être mises en œuvre au champ après épandage de PRO, notamment dans le cadre du futur projet signé avec

VEOLIA Eau¹⁶⁶ qui vise le suivi de l'impact des épandages de boues de stations d'épuration sur les sols canniens. La labellisation, en projet, d'un site d'études à la Réunion dans le SOERE PRO¹⁶⁷ nécessitera ce type de mesures des transferts d'éléments vers l'atmosphère. Dans ce cadre, les expériences passées concernant la mesure des pertes par volatilisation d'ammoniac [Ca10, Ai14, Ai19] après épandage dans deux situations caractéristiques de la Réunion seront valorisées. La présence du mulch de paille de canne à sucre est apparue dans ces études préliminaires comme déterminant des émissions et des transformations du carbone et de l'azote. Développer des recherches sur ces thématiques, notamment dans le cadre de thèses de doctorat (contrats CIFRE avec VEOLIA), sera envisagé.

Le projet de l'unité Recyclage et risque pour le prochain quadriennal et les différents projets de recherche en cours que je présente ci-après serviront de support à ces thématiques de recherches et apporteront les nécessaires collaborations, notamment en sciences de l'environnement, mathématiques, informatique, économie, sociologie, pour mettre en œuvre cette démarche de modélisation intégrée, de simulation et d'analyse des systèmes de production agricole. L'ouverture à des contextes diversifiés (Réunion, Sénégal, Madagascar, Vietnam, Ile de France, Bretagne) va dans le sens de la recherche d'une plus grande généricité des modèles utilisés et devrait permettre des approches comparatives.

III.3. Positionnement scientifique dans mon unité de recherche et les projets en cours

Dans la période quadriennale 2007-2010, récemment évaluée par l'AERES, j'avais animé l'un des axes scientifiques de l'unité qui concernait la gestion des PRO hors sol et dans les territoires. Dans le projet d'unité pour le prochain quadriennal 2011-2014, toujours en conservant la double démarche systémique et analytique, je situe mes activités de recherche et d'animation d'équipe sur les deux thèmes suivants (Fig. 16) :

1. représentation et simulation de la gestion des PRO dans les territoires,
2. qualification (biologique, chimique et physique) des transformations des PRO de leur production à leur utilisation,

pour contribuer à un thème transversal porté par l'ensemble de l'unité et qui concerne l'évaluation de l'impact environnemental du recyclage.

¹⁶⁶ VEOLIA Eau, CIRAD, 2010. Convention pour la valorisation agricole de produits à base de compost de boues ou de boues séchées de la station d'épuration du Grand Prado. Document confidentiel, St Denis de la Réunion, 12 p.

¹⁶⁷ Système d'Observation, d'Etudes et de Recherches en Environnement sur les Produits Résiduels Organiques, coordonné par Sabine Houot, UMR Inra AgroParisTech Environnement et Grande Culture (EGC).



Figure 16. Représentation schématique des thèmes scientifiques proposés dans le projet de l'unité Recyclage et risque (source : Saint Macary *et al.*, 2009)¹⁶⁸

Plusieurs projets en cours constituent les supports de mes recherches.

Projet ANR-08-STRA-15 ISARD (2009-2012) <http://isard.cirad.fr/> « Intensification des systèmes de production agricoles par le recyclage des déchets »

Ce projet, coordonné par Hervé Saint Macray (directeur de l'UPR Recyclage et risque du CIRAD), associe des équipes du CIRAD (UPR recyclage et risque), de l'INRA (UMRs EGC, SADAPT, SAS), de l'IRD¹⁶⁹ (UMR Eco&sol), des universités d'Albi, d'Angers et de Lyon ainsi que des partenaires du sud (Laboratoire des Radio-Isotopes à Madagascar, Institut Sénégalais de la Recherche Agronomique au Sénégal). Quatre terrains sont concernés : Plaine de Versailles et des Alluets (Ile de France), Dakar, Mahajunga, île de la Réunion. Dans ce projet, j'anime avec Christine Aubry (UMR SADAPT) la tâche 2 « Acquisition et formalisation des connaissances sur la gestion des PRO dans les territoires » qui couvre des recherches allant de l'inventaire des puits et sources de produits résiduels organiques à l'analyse des déterminants sociologiques de leur utilisation, en passant par une caractérisation des possibilités de transformation et des pratiques de gestion. Je contribue plus spécifiquement :

- 1) à la simulation de la transformation des PRO, l'objectif étant, grâce à l'élaboration d'un modèle simulant les émissions gazeuses au compostage réalisée dans le cadre de la thèse CIFRE – Crête d'or Entreprise de Didier Oudart, de prédire les pertes de masses (N, C et eau) et de qualifier les produits obtenus après compostage dans les situations contrastées rencontrées sur les différents terrains du projet,
- 2) au paramétrage et à l'utilisation de modèles de flux de PRO à l'île de la Réunion, en particulier sur le territoire de Petit et Grand Tampon en poursuivant le travail engagé avec le modèle multi-agents BIOMAS (collaboration avec le LIM, université de la Réunion), et en appui aux partenaires du terrain de Dakar,
- 3) dans le cadre de la tâche 3, à l'intégration des connaissances relatives aux processus biophysiques (tâche 1) et aux processus de gestion (tâche 2) pour représenter le fonctionnement de systèmes de production agricole à différents niveaux d'organisation (exploitation, territoire), ainsi qu'à l'évaluation multicritères, par simulation, de systèmes de recyclage ; il s'agit ici de produire une démarche générique d'articulation entre outils et référentiels qui permettent d'étudier des situations territoriales contrastées de recyclage de PRO.

¹⁶⁸ SAINT-MACARY *et al.*, 2009. Présentation du projet d'avenir de l'unité propre de recherche Risque environnemental lié au recyclage. Document d'évaluation remis à l'AERES, CIRAD, 23 p.

¹⁶⁹ Institut de Recherche pour le Développement

Projet Ministère de l'agriculture CasDar GIROVAR (2011-2013) « Gestion Intégrée des Résidus Organiques par la Valorisation Agronomique à la Réunion »

Ce projet labellisé par le réseau mixte technologique « Fertilisation et Environnement » et le pôle de compétitivité de la Réunion Qualitropic associe le CIRAD (coordination par Tom Wassenaar, collègue de l'UPR Recyclage et risque), seul partenaire scientifique, à des partenaires locaux acteurs potentiels de l'organisation du recyclage de PRO à l'échelle du territoire des communes de l'ouest de la Réunion (communauté regroupant 5 communes). Partant de la demande en PRO des systèmes de cultures, il s'agit 1) de construire, avec une approche participative, des scénarios prospectifs visant à valoriser au mieux les PRO d'origine urbaine, industrielle ou agricole produits sur le territoire, 2) d'évaluer ces scénarios au regard de critères agronomiques, environnementaux, économiques et sociaux, et 3) de produire et diffuser une démarche générique de gestion territoriale concertée. Dans ce projet, je contribue plus spécifiquement :

- 1) à traduire la demande des systèmes de culture sous forme de plans de fertilisation et d'épandage de PRO,
- 2) à simuler les flux de PRO entre unités productrices et consommatrices en paramétrant et adaptant les modèles de flux produits dans l'unité de recherche dans l'objectif d'évaluer les scénarios aux plans logistique et environnemental,
- 3) à fournir l'expertise nécessaire à la construction des scénarios concernant la transformation possible des PRO, notamment par compostage.

Programme Etat-Région Réunion-UE PILMO (2011-2013) « Pilotage des apports organiques et impacts environnementaux »

Ce programme fait partie intégrante d'une convention pluriannuelle (2008-2013) tripartite, entre le CIRAD, la Région Réunion et l'Union Européenne, qui regroupe 12 programmes de recherche. Conduit spécifiquement par l'unité Recyclage et risque à la Réunion, le programme PILMO vise la production de connaissances et d'outils pour aider les acteurs à mieux gérer les transferts, les transformations et les apports de matières organiques d'origine agricole, urbaine ou industrielle, tout en préservant l'environnement. A compter du 01/01/2011, j'assume la responsabilité administrative et scientifique de ce programme qui regroupe 3 projets de recherche. Mes propres recherches contribuent plus spécifiquement aux projets PILMO 4 (thèmes iii et iv ci-dessous) et PILMO 5 (thème ii ci-dessous) :

- 1) PILMO 4 « Gestion territoriale et modélisation des flux de matières organiques » abordant les 4 thèmes suivants : i) gestion territoriale des matières organiques, ii) modélisation de l'activité humaine dans les systèmes de production agricoles, iii) intégration de connaissances biophysiques dans les modèles de systèmes de production et iv) construction d'une méthodologie de simulation à l'aide de modèles pour l'analyse et l'évaluation de systèmes de production agricole.
Valoriser les différentes matières organiques produites à la Réunion en organisant mieux leur répartition spatiale et temporelle est l'objectif opérationnel de ce projet. Les retombées attendues de ces recherches pour les acteurs, sont des économies potentielles de fertilisants minéraux et d'amendements organiques, ce qui contribuerait à l'autonomie de la Réunion en énergie indirecte et à la réduction de l'impact des GES. La démarche mise en œuvre peut également constituer une retombée en termes de gouvernance territoriale.
- 2) PILMO 5 « Caractérisation des matières organiques et étude de leur transformation ; qualification de l'état organique des sols » abordant les 2 thèmes suivants : i) valorisation des matières organiques par des usages agricoles ou non agricoles et ii) transformation des matières organiques.
Rechercher et concevoir de nouveaux produits organiques est le but opérationnel de ce projet. La substitution de fertilisants minéraux et d'amendements organiques importés constitue la retombée attendue principale (autonomie, énergie indirecte, GES). Pouvoir disposer d'outils pour mieux raisonner les transformations hors sol des matières organiques et prédire leurs usages est aussi une retombée directe dont pourront bénéficier les acteurs économiques de la Réunion.
- 3) PILMO 6 « Impact de la valorisation des produits résiduels organiques sur la dynamique et la phytodisponibilité des éléments traces métalliques » abordant les 2 thèmes suivants : i) mise

au point de systèmes de culture épurateurs et ii) dynamique et phytodisponibilité des éléments traces métalliques.

Identifier les situations à risque et préciser les conditions (combinaisons sol-PRO-plante) d'une valorisation des matières organiques respectueuse de l'environnement et de la santé sont les objectifs opérationnels de ce projet. Les retombées attendues sont l'adaptation de cadres réglementaires aux conditions de la Réunion et la définition de mesures et d'indicateurs pertinents dans ce contexte.

Pôle d'excellence « Services et impacts des systèmes de production agricole en milieu tropical »

Les 12 programmes de recherche conduits par le CIRAD à la Réunion sont en cours de structuration autour de 3 pôles d'excellence, reconnus comme dispositifs prioritaires du CIRAD au niveau international <http://www.cirad.fr/qui-sommes-nous/le-cirad-en-bref>. Avec mon collègue François Guerrin, nous coordonnons l'initiative de création du pôle « Services et impacts des systèmes de production agricole en milieu tropical ». Avec les responsables des programmes concernés, nous avons rédigé une note de positionnement scientifique permettant d'afficher une plus grande lisibilité de nos travaux conduits à la Réunion et dans la région de l'océan Indien. Grâce à la présence d'HDR au sein de ce collectif, l'ambition immédiate (démarche en cours) est de solliciter l'intégration d'équipes du pôle dans l'école doctorale Sciences, Technologie, Santé de l'université de la Réunion.

Ce pôle bénéficie de l'implication de 5 unités de recherche du CIRAD : les unités mixtes de recherche « Systèmes d'élevage méditerranéens et tropicaux » (UMR SELMET) et « Territoires, environnement, télédétection et information spatiale » (UMR TETIS), les unités de recherche « Gestion des ressources renouvelables et environnement » (UPR GREEN), « Recyclage et risque » (UPR 78) et « Systèmes de culture annuels » (UPR SCA), et de l'unité de service « Analyses des eaux, sols et végétaux » (US 49). Le pôle est constitué par le regroupement des quatre programmes actuels suivants (programmation 2008-2013 du CIRAD à la Réunion) : « Productivité durable des systèmes cannières et fonctionnement des exploitations » (CAS), « Conduite intégrée des exploitations et des filières d'élevage » (CIEEL), « Aide à la gestion concertée des ressources et des territoires en milieu rural » (GERT), « Pilotage des apports organiques et impacts environnementaux » (PILMO, cf. ci-dessus). Ses compétences scientifiques couvrent la science du sol, les sciences agronomiques, animales et vétérinaires, les sciences humaines et sociales, ainsi que la modélisation et l'informatique appliquée. Il comptabilise actuellement 20 chercheurs permanents, 6 thésards, 32 techniciens et personnels d'appui.

Les questions de recherche traitées s'adressent à différentes échelles et niveaux d'organisation : du territoire, où sont identifiées les questions sociétales majeures concernant la gestion de long terme des ressources par l'agriculture et son lien à l'environnement, à la parcelle, où certains processus biophysiques et impacts sont quantifiés, en passant par l'exploitation, où des recherches sont menées sur l'évaluation et la conception de systèmes agricoles performants aux plans agronomique, socio-économique et environnemental. Ces questions sont regroupées en quatre thèmes (extrait de la note de présentation du pôle) :

- 1) Etude des interactions entre activités pour la gestion intégrée des territoires.
Les adaptations structurelles et organisationnelles auxquelles doivent recourir les systèmes de production sont, de plus en plus souvent, raisonnées dans un cadre collectif, en complémentarité avec d'autres filières de production agricoles ou non-agricoles. Le cadre classique de l'exploitation, comme unité productive de base gérée par un décideur unique, tend donc à éclater au profit d'une organisation en réseau, faisant intervenir de multiples acteurs et unités de production. Dès lors, raisonner la gestion et l'adaptation des systèmes de production agricoles ne peut se limiter au cadre de l'exploitation individuelle et doit impérativement se placer dans celui, collectif, du territoire. Il s'agit de gérer l'espace agricole en relation (concurrence ou complémentarité) avec celui nécessaire à l'urbanisation et à la conservation de la Nature, deux traits fondamentaux d'une île à forte croissance démographique dont les richesses naturelles (pitons, cirques et remparts) viennent de se voir consacrer patrimoine mondial de l'UNESCO. Cette intégration se réalise en valorisant les différentes fonctions de l'agriculture au bénéfice du développement du territoire.
- 2) Conception de systèmes de production écologiquement intensifs.
Pour contribuer à la durabilité du territoire, l'agriculture doit évoluer vers des modes de production plus efficaces. La Réunion est un territoire d'étude particulièrement intéressant,

notamment pour ce qui concerne les systèmes canniers et d'élevage qui utilisent à eux deux environ 80% de la SAU. La conception de systèmes innovants peut être décrite selon trois degrés d'innovation croissante : adaptation de l'existant face aux changements, recherche d'une efficience accrue, développement de nouvelles fonctions.

- 3) Représentation et évaluation des systèmes de production et des filières agricoles.
La conception d'innovations pour augmenter la durabilité de l'agriculture, que ce soit au sein des systèmes de production ou dans les interactions entre activités au niveau du territoire, nécessite des recherches visant (1) la représentation appropriée des systèmes concernés et (2) l'évaluation pertinente de leurs impacts. L'objectif principal de cette recherche méthodologique est de concevoir des outils pour expérimenter et évaluer, dans le temps et dans l'espace, les conséquences, positives et négatives, de facteurs de changement ou de modes de gestion sur la production agricole, les services écosystémiques et les risques liés aux pratiques. Ces outils sont, d'une part, des modèles systémiques intégrant les pratiques de gestion et certains processus biophysiques et, d'autre part, des méthodes d'évaluation multicritères.
- 4) Etude des processus biophysiques impliqués dans les services et impacts environnementaux.
Evaluer les systèmes de production et en concevoir de nouveaux n'est possible que si les ressources mises en jeu sont suffisamment bien connues. Pour cela, il est nécessaire d'appréhender leurs dynamiques, en particulier celles qui sont sous l'influence des pratiques agricoles et des stratégies de gestion des agriculteurs. Dans les systèmes étudiés, la caractérisation des ressources concerne aussi bien les animaux que les plantes, les sols ou les matières organiques. L'étude des processus de transformation des matières organiques, dans le sol et hors sol, est par ailleurs nécessaire pour raisonner les fonctions de l'agriculture liées à l'environnement. Enfin, l'effort de quantification des impacts des systèmes de production agricoles sur les ressources (accumulation dans les sols de contaminants divers ou leur transfert vers les plantes, l'air et l'eau) est indispensable pour évaluer leur durabilité. Cette quantification passe, notamment, par la construction d'indicateurs et de modèles génératrice de plusieurs questions de recherche spécifiques.

Au plan personnel, hormis la tâche d'animation scientifique de ce pôle, ma contribution aux recherches concernera les thématiques déjà décrites ci-dessus à propos du programme PILMO et qui s'intègrent dans le projet de l'unité Recyclage et risque pour le prochain quadriennal.

Bibliographie

- ACADEMIE DES SCIENCES (coll.), 2003. Changements d'échelles, outils communs, production d'indicateurs. *In* : Etudes sur l'environnement – De l'échelle du territoire à celle du continent, Rapports sur la Science et la Technologie n°15, juin 2003, pp 188-201.
- ALARY V., MESSAD S., TACHÉ C., TILLARD E., 2002. Approche de la diversité des systèmes d'élevage laitiers à La Réunion. *Revue d'Elevage et de Médecine Vétérinaire des Pays Tropicaux* 55 (4), 285-297.
- ALBALADEJO C., CASABIANCA F. (editors), 1997. La recherche-action: ambitions, pratiques, débats. Document Etudes et Recherches sur les Systemes Agraires et le Developpement, num. 30. INRA, Versailles, France.
- ANDRIAMASINORO F., 2003. Proposition d'un modèle d'agents hybrides basé sur la motivation naturelle. Thèse de doctorat, Université de la Réunion.
- ANDRIEU J.-P., DEMARQUILLY C., 1987. Valeur nutritive des fourrages : tables et prévisions. *In* : Bulletin Technique C.R.Z.V. Theix, Institut National de la Recherche Agronomique, Ceyrat, (70), pp 61-73.
- ANTONA M., D'AQUINO P., AUBERT S., BARRETEAU O., BOISSAU S., BOUSQUET F., DARE W., ÉTIENNE M., LE PAGE C., MATHEVET R., TREBUIL G., WEBER J., 2005. La modélisation comme outil d'accompagnement. *Natures Sciences Sociétés* 13, 165-168.
- APSIMON H.M., KRUSE M., BELL J.N.B., 1987. Ammonia emissions and their role in acid deposition. *Atmospheric Environment* 21 (9), 1939–1946.
- ATTONATY J.M., CHATELIN M.H., MOUSSET J., 1993. A Decision Support System based on farmers knowledge to assess him in decision making about work organisation and long term evolution. *In*: International Seminar of CIGR Models Computer Programs and Expert Systems for Agricultural Mechanization, Florenza, Italy, 1–2 October, 1993, pp. 8–22.
- AUBIN J., VAN DER WERF H.M.G., 2009. – Pisciculture et environnement, apports de l'Analyse de Cycle de Vie. *Cahiers d'Agriculture*, 18 (2), 220-226.
- AUBRY C., 2007. La gestion technique des exploitations agricoles, composante de la théorie agronomique. Mémoire d'habilitation à diriger des recherches, Institut national polytechnique de Toulouse, 94 p.
- AUBRY C., PAPY F., CAPILLON A., 1998. Modelling decision-making processes for annual crop management. *Agricultural Systems*, 56(1) : 45-65.
- AUFRERE J., MICHALET-DOREAU B., 1988. Comparison of methods for predicting digestibility of feeds. *In*: *Animal Feed Science and Technology*, 20, pp 203-218.
- BARRETEAU O., TREUIL J.-P., 2009. De l'individuel au collectif, de l'optimisation à la coordination. *In* : *Modélisation de l'environnement : entre natures et sociétés*, D. Hervé & F Laloë (Ed.), Ed. Quae, NSS-dialogues, p. 53-70.
- BASSET-MENS C., VAN DER WERF H.M.G., 2005. – Scenario-based environmental assessment of farming systems: the case of pig production in France. *Agriculture Ecosystems and Environment*, 105 (1–2), 127-144.
- BELLON S., LESCOURET F., CALMET J.P., 2001. Characterisation of apple orchard management system in a french mediterranean vulnerable zone. *Agronomie* 21 (3), 203–213.
- BERNAL M.P., KIRCHMANN H., 1992. Carbon and nitrogen mineralization and ammonia volatilization from fresh, aerobically and anaerobically treated pig manure during incubation with soil. *Biology and Fertility of Soils*, 13 (3), 135–141.
- BOIFFIN J., HUBERT B., DURAND N., 2004. Agriculture et développement durable : enjeux et questions de recherche. Dossier, INRA (Ed.), Paris, 47 p.
- BOUSQUET F., BAKAM F., PROTON H., LEPAGE C., 1998. Cormas : Common-Pool Resources and Multi-Agent Systems. Actes de la conf. IEA-AIE-98, Modelling and Simulation of Ecological/Environmental Systems, Castellon (E), 1-4 juin 1998, p.826-837.
- BOUSQUET *et al.* (collectif COMOD), 2009. La posture d'accompagnement des processus de prise de décision : les références et les questions transdisciplinaires. *In* : *Modélisation de l'environnement : entre natures et sociétés*, D. Hervé & F Laloë (Ed.), Ed. Quae, NSS-dialogues, p. 71-89.
- BRISSEON N., GARY C., JUSTES E., ROCHE R., MARY B., RIPOCHE D., ZIMMER D., SIERRA J., BERTUZZI P., BURGER P., 2003. An overview of the crop model STICS, *European Journal of Agronomy*, 18, 309-332.
- BUSSINK D.W., HUIJSMANS J.F.M., KETELAARS J.J.M.H., 1994. Ammonia volatilization from nitric acid-treated cattle slurry surface applied to grassland. *Netherlands Journal of Agricultural Science*, 42:293-309.
- CAPILLON A., LEGENDRE J., SIMIER J. P., VEDEL G., 1988. Typologie et suivis technico-économiques d'exploitations : quels apports pour l'amélioration des systèmes fourragers ? *Journées de l'AFFP*, Paris, 33-55.
- CAPILLON A., MANICHON H., 1991. Guide d'étude de l'exploitation agricole. *In* : *Relance agronomique*, INA-PG/APCA, 65 p.
- CASAGRANDE J.-R., 1991. La modélisation de la récolte des fourrages : cas du foin en grosses balles cylindriques. Thèse de doctorat de l'Institut National Agronomique Paris-Grignon, Centre National du Machinisme Agricole du Génie Rural des Eaux et des Forêts, Montoldre, 163 p + annexes.

- CHABALIER P., VAN DE KERCHOVE V., SAINT MACARY H., 2006. Guide de la fertilisation organique à La Réunion. Montpellier : CIRAD, 302 p.
- CHENOST M., GAILLARD F., 1996. Rapport de mission à l'île de La Réunion du 26 juin au 5 juillet. SNRH-INRA Theix et CEMAGREF Montoldre, Centre de coopération Internationale de Recherche Agronomique pour le Développement, St Denis de La Réunion, 23 p.
- COQUIL X., FAVERDIN P., GARCIA F., 2005. Modélisation dynamique de la démographie d'un troupeau bovin laitier. In : 3R 2005, 12th Congress Rencontres autour des Recherches sur les Ruminants, 7-8 December, Paris, France, pp. 213.
- CROS M.J., DURU M., GARCIA F., MARTIN-CLOUAIRE R., 2003. A biophysical dairy farm model to evaluate rotational grazing management strategies. *Agro*. 23, 105-122.
- DECISIA, 2003. SpadVersion: MN: SPAD 5.6.0. Copyright 1982-2009.
- DELAGARDE R., FAVERDIN P., BARATTE C., PEYRAUD J.L., 2004. Prévoir l'ingestion et la production des vaches laitières : GRAZEIN, un modèle pour raisonner l'alimentation au pâturage. In : 3R 2004, 11th Congress Rencontres autour des Recherches sur les Ruminants, 8-9 December, Paris, France, pp. 295-298.
- DEMARQUILLY C., 1986. L'ensilage et l'évolution récente des conservateurs. In : Bulletin Technique C.R.Z.V. Theix, Institut National de la Recherche Agronomique, Ceyrat, (63), pp 5-12.
- DEMARQUILLY C., 1987. La fénaison : évolution de la plante au champ entre la fauche et la récolte, perte d'eau, métabolisme, modifications de la composition morphologique et chimique. In : Les fourrages secs : récolte, traitement, utilisation, C. Demarquilly Ed., INRA, Paris, pp 23-46.
- DEMARQUILLY C., 1993. Qualité de conservation de l'ensilage en balles : quelles perspectives liées à l'emploi de conservateurs, au troncement ? Que peut-on escompter des nouvelles techniques qui apparaissent ? In : Commission ensilage, journée technique de Varennes s/Allier le 17 juin 1993, Comité des Plastiques en Agriculture, Paris, pp 46-50.
- DEMARQUILLY C., ANDRIEU J.-P., SAUVANT D., DULPHY J.-P., 1980. Composition et valeur nutritive des aliments. In : Alimentation des ruminants, R. Jarrige Ed., Institut National de la Recherche Agronomique, Versailles, pp 469-518.
- DEROUAND B., BROD N., 2010. Propositions de modification du programme POSEI 2011. Dossier de la Direction de l'Agriculture et de la Forêt, St Denis de la Réunion, 5 p.
- DOUNIAS I., AUBRY C., CAPILLON A., 2002. Decision-making processes for crop management on African farms : modelling from a case study of cotton crops in northern Cameroon. *Agricultural Systems* 73, 233-260.
- DOURMAD J.-Y., LETERME P., MORVAN T., PEYRAUD J.-L., VERTES F., 1997. -Les flux d'azote dans les exploitations d'élevage. In : RIOU C., BONHOMME R., CHASSIN P., NEVEU A., PAPY F., L'eau dans l'espace rural : production végétale et qualité de l'eau, INRA, Paris, 281-301.
- DUBEUF B., FLEURY P., JEANNIN B., 1995. Diversité des fonctionnements fourragers et conséquences pour le conseil. *Fourrages*, 141, Paris, 19-32.
- DULPHY, J.P., DEMARQUILLY, C., 1981. Problèmes particuliers aux ensilages. In: Prévision de la valeur nutritive des aliments des ruminants, (Ed.) INRA publications, Versailles, pp. 81-104.
- DURU M., PAPY F., SOLER L.-G., 1988. Le concept de modèle général et l'analyse du fonctionnement de l'exploitation agricole. *C.R. Acad. Agric. Fr.*, 74(4) : 81-93.
- FANGMEIER A., HADWIGER-FANGMEIER A., VAN DER EERDEN L., JAEGER H.J., 1994. Effects of atmospheric ammonia on vegetation—A review. *Environmental Pollution* 86 (1), 43-82.
- FAROLFI S., LE PAGE C., TIDBALL M., BOMMEL P., 2002. Management of livestock effluents in Réunion : use of a multi-agent system to analyse the economic behaviour of players. *Proc. International Conference Agent BAsed Simulation III*, Passau (Germany), 7-9 April 2002, 9 pp.
- FLEURY P., DUBEUF B., JEANNIN B., 1995. Un concept pour le conseil en exploitation laitière : le fonctionnement fourrager. *Fourrages*, 141, Paris, 3-18.
- FOX D.G., TEDESCHI L.O., TYLUTKI T.P., RUSSELL J.B., VAN AMBURGH M.E., CHASE L.E., PELL A.N., OVERTON T.R., 2004. The Cornell Net Carbohydrate and Protein System model for evaluating herd nutrition and nutrient excretion. *Animal Feed Science and Technology* 112, 29-78.
- FROST J.P., 1994. Effect of spreading method, application rate and dilution on ammonia volatilization from cattle slurry. *Grass and Forage Science*, 49:391-400.
- GAILLARD F., BERNER J.-L., 1989. Le banderolage des balles d'ensilage - Etude de l'étanchéité des films. In : Bulletin Technique du Machinisme et des Equipements Agricoles, CEMAGREF, Antony, n°36, pp 35-43.
- GENERMONT S., 1996. Modélisation de la volatilisation d'ammoniac après épandage de lisier sur parcelle agricole. Thèse de Doctorat, Université Paul Sabatier, Toulouse, 331 p.
- GENERMONT S., CELLIER P., 1997. A mechanistic model for estimating ammonia volatilization from slurry applied to bare soil. *Agricultural and Forest Meteorology* 88(1/4), 145-167.
- GIRARD N., HAVET A., CHATELIN M. H., GIBON A., HUBERT B., RELIER J. P., 1994. Formalisation des relations entre stratégie et pilotage dans les systèmes fourragers. Proposition pour la conception d'instruments d'aide à la décision. *Recherches-système en agriculture et développement rural*, Inra, Paris, 223-229.
- GIRARD N., LASSEUR J., 1997. Stratégies d'élevage et maîtrise de la répartition temporelle de la production - Exemple des élevages ovins allaitant en montagne méditerranéenne. *Cahiers de l'agriculture*, 6, Paris, 115-124.

- GOUET P., GIRARDEAU J.-P., RIOU Y., 1979. La flore microbienne des ensilages - II. Intérêt de l'inoculation de bactéries lactiques dans les ensilages de fourrages verts, influence du nombre, du conditionnement et de l'addition de glucides. In : Bulletin Technique, C.R.Z.V., Institut National de la Recherche Agronomique, Theix, (37), pp 25-30.
- GUERRIN F., 2001. Magma: A model to help manage animal wastes at the farm level. *Comp. and Elect. in Ag.*, 33(1): 35-54.
- GUERRIN F., 2004. Simulation of stock control policies in a two-stage production system. Application to pig slurry management involving multiple farms. *Computers and Electronics in Agriculture*, 45(1-3): 27-50.
- GUERRIN F., 2007. Représentation des connaissances pour la décision et pour l'action. Mémoire d'habilitation à diriger des recherches, Université de la Réunion, 155 p.
- GUERRIN F., 2009. Dynamic simulation of action at operations level. *Autonomous agents and multi-agents systems*, 18 (1) : 156-185.
- GUERRIN F., MEDOC J.-M., 2005. A simulation approach to evaluate supply policies of a pig slurry treatment plant by multiple farms. EFITA/WCCA 2005 Joint Conference, The 5th Conference of the European Federation for Information Technology in Agriculture, Food and Environment and The 3rd World Congress on Computers in Agriculture and Natural Resources, Vila Real (Portugal), July 25-28 2005. Paper #B03.3/PA 305.
- GUERRIN F., RANAIVOSOLO P.W., 2001. Managing the supply of a slurry treatment plant by means of a hybrid dynamical system. 2nd IFAC-CIGR Workshop on Intelligent Control For Agricultural Applications, Bali (Indonesia), August 22-24, p. 134-139.
- GUINÉE J.B., GORRÉE M., HEIJUNGS R., HUPPES G., KLEIJN R., DE KONING A., VAN OERS L., WEGENER SLEESWIJK A., SUH S., UDO DE HAES H.A., DE BRUIJN H., VAN DUIN R., HUIJBREGTS M.A.J., 2002. Life cycle assessment. An operational guide to the ISO standards. Centre of Environmental Science, Leiden University, Leiden, The Netherlands.
- HASSOUN P., 1987. Amélioration de la valeur nutritive de la bagasse de canne à sucre par un traitement à l'ammoniac (généré par hydrolyse de l'urée) et son utilisation par les ruminants. Rôle des micro-organismes sur l'uréolyse. Thèse de doctorat Université des Sciences et Techniques du Languedoc, Montpellier, 225 p.
- HASSOUN P., FULCHERI C., NABENEZA S., 2002. Feeding dairy heifers untreated or urea-treated fibrous sugarcane residues: effect on dry matter intake, growth, and metabolic parameters. *Animal Feed Science and Technology*, 100 (2002) 31-41.
- HELIAS A., GUERRIN F., LOPEZ P., STEYER J.P., 2001. Simulating management policies on stock supplied by multiple production units: application to a pig slurry treatment plant. *Efita 2001, 3rd Conf. of the European Federation for Information Technology in Agriculture, Food and Environment*, Montpellier (F), June 18-21, paper # 103, 6 p.
- HELLEBRAND H.J., 1998. Emission of nitrous oxide and other trace gases during composting of grass and green waste. *Journal of Agricultural Engineering Research*, Vol. 69, N° 4, 365-375.
- HERVE D., CASTELLA J.-C., 2009. Espaces, temps, acteurs : regards d'agronomes. In : *Modélisation de l'environnement : entre natures et sociétés*, D. Hervé & F Laloë (Ed.), Ed. Quae, NSS-dialogues, p. 93-111.
- HOUGHTON, J.T., DING, Y., GRIGGS, D.J., NOGUER, M., VAN DER LINDEN, P.J., DAI, X., MASKELL, K., JOHNSON, C.A., 2001. Climate change 2001: the scientific basis. Report of the IPCC working group I, 96 p.
- HUBERT B., GIRARD N., LASSEUR J., BELLON S., 1993. Les systèmes d'élevage ovin préalpains : derrière les pratiques, des conceptions modélisables. *Etudes et recherches sur les systèmes agraires et le développement*, Inra, 27, Paris, 351-385.
- INRA, 2003. INRAtion 3.0. Available from: <www.inration.educagri.fr>.
- INSTITUT DE L'ELEVAGE, 1996. -DEXEL : Guide de l'utilisateur. Tableaux de référence. Institut de l'Elevage, 60 p.
- JACOBSEN B.H., PETERSEN B.M., BERNTSEN J., BOYE C., SØRENSEN C.G., SØGAARD H.T., HANSEN J.P. 1998. An integrated economic and environmental farm simulation model (FASSET). In Danish Institute of Agricultural and Fisheries Economics, Report No. 102. Copenhagen, Denmark: Danish Institute of Agricultural and Fisheries Economics.
- JARVIS S.C., WILKINS R.J., PAIN B.F.M., 1996. Opportunities for reducing the environmental impact of dairy farming managements : a systems approach. *Grass and Forage Science*, 51, 21-31.
- JOLLIVET M., 2009. L'interdisciplinarité : une démarche de recherche à construire. In : *Modélisation de l'environnement : entre natures et sociétés*, D. Hervé & F Laloë (Ed.), Ed. Quae, NSS-dialogues, p. 13-17.
- KANYARUSHOKI C., VAN DER WERF H.M.G., ROGER F., CORSON M., 2008. – EDEN : un outil opérationnel pour l'évaluation environnementale des systèmes de production laitiers. ECOTECHS 08 : des éco-indicateurs à l'évaluation et à la certification environnementale, Cemagref, 21-22 octobre 2008, Montoldre (F).
- KIRCHMANN H., WITTER E., 1989. Ammonia volatilization during aerobic and anaerobic manure decomposition. *Plant and Soil* 115 (1), 35-41.
- KURODA K., TAKASHI O., MITIHIRO Y., AKANE K., TAKAKO N., SIGENORI M., TOMOKO K., 1996. Emissions of malodorous compounds and greenhouse gases from composting swine feces. *Bioresource Technology* 56, 265-271.
- LALOE F., CHABOUD C., 2009. Aide à la décision, expertise et action. In : *Modélisation de l'environnement : entre natures et sociétés*, D. Hervé & F Laloë (Ed.), Ed. Quae, NSS-dialogues, p. 165-177.
- LANDAIS, 1998. Agriculture durable : les fondements d'un nouveau contrat social ? *Le courrier de l'environnement*, INRA (ed.), n°33, pp 5-22.
- LE GAL P.Y., PAPY F., 1998. Co-ordination processes in collectively managed cropping systems: double cropping of irrigated rice in Senegal. *Agricultural Systems* 57 (2), 135-159.

- LE MESRE DE PAS D., 2001. Modélisation des procédés de traitement des effluents d'élevage en vue de leur évaluation. Rapport de stage de 2ème année, ENSAM, CIRAD, Montpellier, 54 p.
- LETEINTURIER B., OGER R., BUFFET D., 2004. Rapport technique sur le nouveau module de croissance prairiale. Centre de Recherches Agronomiques de Gembloux, Belgique, 37 pp.
- LETERME P. et al., 2010. Projet ANR-06-PADD-017 SPA/DD – Programme ADD édition 2006 – Compte rendu de fin de projet. Agence nationale de la recherche, 48 p.
- LEVASSEUR P., LEMAIRE N., 2006. – Etat des lieux du traitement des lisiers de porcs en France. *Techni porc*, 29, n°1, 29-31.
- LEWIS, K.A., NEWBOLD, M.J. AND TZILIVAKIS, J. 1999. Developing an emissions inventory from farm data. *Journal of Environmental Management*, 55, 183-197.
- LOYON L., GUIZIOU F., BELINE F., PEU P., 2007. Gaseous emissions (NH₃, N₂O, CH₄ and CO₂) from the aerobic treatment of piggery slurry – comparison with conventional storage system. *Biosyst. Eng.*, 97, 472-480.
- MARCAZZAN G. M., VACCARO S., VALLI G., VECCHI R., 2001. Characterization of PM₁₀ and PM_{2.5} particulate matter in the ambient air of Milan (Italy). *Atmospheric Environment* 35, 4639–4650.
- MARTIN M., PIQUET E., LE PAGE C., GUERRIN F., 2001. MagmaS: a multi-agents system based on dynamical models coupling; application to animal wastes management. In: N. Giambiasi & C. Frydman, ESS'01, 13th European Simulation Symposium, Simulation in Industry, Multi-agent based Modelling and Simulation Workshop, Marseille (F), October 18-20, p. 881-884.
- MARTIN-CLOUAIRE R., RELIER J.P., 2003. A conceptualization of farm management strategies, Proc. of EFITA-03 conference, July 5-9, Debrecen, Hungary, pp 719-726.
- MARTINE J.F., 2003. Modélisation de la production potentielle de la canne à sucre en zone tropicale, sous conditions thermiques et hydriques contrastées. Application du modèle. PhD thesis, INA-PG, Paris, 116 pp.
- MARTINS O., DEWEES, T., 1992. Loss of nitrogenous compounds during composting of animal wastes. *Bioresource Technology* 42 (1), 103-111.
- MCCOWN R., 2002. Changing systems for supporting farmers-decisions : problems, paradigms and prospects. *Agricultural Systems*, 74(1) :179-220.
- MCCOWN R., HAMMER G., HARGREAVES J., HOLZWORTH D., FREEBAIRN D., 1996. Apsim : A novel software system for model development, model testing and simulation in agri- cultural systems research, *Agricultural Systems*, 50 :255–271.
- MCDONALD P., HENDERSON A.R., HERON S.J.E., 1991. The biochemistry of silage. Second edition, Chalcombe Publications, Marlow, 340 p.
- MEDA C., 2008. Évaluation environnementale des systèmes de production porcine – Intérêt d'une approche combinant modélisation et Analyse du Cycle de Vie. Mémoire de Master, Agrocampus Ouest, Rennes (FRA).
- MEDOC J.-M., GUERRIN F., 2006. Utilisation de modèles de simulation pour élaborer une stratégie de gestion collective des lisiers de porcs à Grand Ile Salazie – La Réunion. Rapport technique GIS Porcherie Verte, CIRAD, 72 p.
- MIRE (Mission Régionale et Interdépartementale de l'Eau), 2004. La résorption des excédents d'azote en Bretagne. Préfecture de la Région Bretagne, Rennes, France.
- MISSELBROOK T.H., NICHOLSON F.A., CHAMBERS B.J., 2005. Predicting ammonia losses following the application of livestock slurry to land, *Bioresource Technology* 96, 159-168.
- MISSELBROOK T.H., NICHOLSON F.A., CHAMBERS B.J., JOHNSON R.A., 2005. Measuring ammonia emissions from land applied manure: an intercomparison of commonly used samplers and techniques. *Environmental Pollution* 135(3), 389-397.
- MOAL J.F., MARTINEZ J., GUIZIOU F., COSTE C.M., 1995. Ammonia volatilization following surface-applied pig and cattle slurry in France. *Journal of Agricultural. Science* 125, 245-252.
- MORVAN T., LETERME P. 2001. Vers une prévision opérationnelle des flux de N résultant de l'épandage de lisier: paramétrage d'un modèle dynamique de simulation des transformations de l'azote des lisiers (STAL). *Ingénieries* 26, 17-26.
- PAPY F., 1994. Working Knowledge concerning technical systems and decision support. In: J.B. Dent & M.J. McGregor (Eds.), *Rural and Farming Systems Analysis, European Perspectives*, Cab International, UK, pp. 222-235.
- PAYRAUDEAU S., VAN DER WERF H., VERTES F., 2007. – Analysis of the uncertainty associated with the estimation of nitrogen losses from farming systems. *Agricultural Systems*, 94, 416-430.
- PAYRAUDEAU S., VAN DER WERF H.M.G., 2005. Environmental impact assessment for a farming region: a review of methods. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 107 (1), p. 1-19.
- PELLETIER F., GODBOUT S., LAROUCHE J.P., LEMAY S., MARQUIS A., 2006. Ammonia emissions from swine manure storage tank. Technology for Recycling of Manure and Organic Residues in a Whole-Farm Perspective. Vol. II. 12th Ramiran International conference. DIAS report Plant production, 123, 249-252.
- PERRET S., 1992. Etude de propriétés physiques, hydriques et mécaniques de sols andiques de La Réunion - Facteurs naturels et anthropiques d'évolution des horizons culturels, implications agronomiques et écologiques. Thèse de Doctorat en Sciences Agronomiques, ENSAM, CIRAD, Montpellier, 278 p.
- PERRET S., 1995. Des outils pour raisonner et conduire des actions de recherche. Cas de la gestion des ressources naturelles dans les Hauts de l'Ouest (Réunion). In : *Méthodes Participatives de Recherche et de Développement dans l'Océan Indien*. Saint-Denis : CIRAD-SAR, 7 p.. Méthodes participatives de recherche et de développement dans l'océan indien, 1995-11-06/1995-11-10, (Saint-Leu, Réunion).

- PORPHYRE V., NGUYEN QUE COI (Editors), 2006. Pig Production Development, Animal Waste Management and Environmental Protection: a Case Study in Thai Binh Province, Northern Vietnam. PRISE publications, France.
- RALAMBONDRAINY T., 2009. Observation de simulations multi-agents à grande échelle. Thèse de doctorat, Université de la Réunion.
- ROBIN P., HASSOUNA M., RAMONET Y., TEXIER C., 2004. Maîtrise des émissions gazeuses en bâtiments sur litière (validation en élevages des résultats acquis en conditions climatiques contrôlées). Rapport Final, convention MAAPAR / INRA, action de recherche 41b Porcherie verte, 106 p.
- ROTZ C.A., COINER C.U., 2004. The integrated farm system model : reference manual.
- RUIZ L., 2003. Valorisation agronomique des effluents et évaluation du risque environnemental - Propositions pour l'utilisation du modèle Stics. In : F. Guerrin, J.-M. Paillat (éditeurs scientifiques), 2003. Modélisation des flux de biomasse et des transferts de fertilité - cas de la gestion des effluents d'élevage à l'île de la Réunion. Restitution des travaux de l'Atp 60/99. Actes du séminaire des 19-20 juin 2002, Montpellier, France, Cirad, Colloques, Cédérom.
- RYDEN J.C., MCNEILL J.E., 1984. Application of the micrometeorological mass balance method to the determination of ammonia loss from a grazed sward. *Journal of the Science of Food and Agriculture* 35, 1297-1310.
- RYKIEL E., 1996. Testing ecological model : the meaning of validation, *Ecological Modelling*, 90 :229-244.
- SAINT MACARY H, MEDOC J.-M., CHABALIER P.-F., 2003. Systèmes de culture de la Réunion – Typologie, spatialisation et éléments pour un référentiel. In F. Guerrin, J.-M. Paillat (éditeurs scientifiques), 2003. Modélisation des flux de biomasse et des transferts de fertilité - cas de la gestion des effluents d'élevage à l'île de la Réunion. Restitution des travaux de l'Atp 60/99. Actes du séminaire des 19-20 juin 2002, Montpellier, France. Cirad, Colloques, Cédérom.
- SAINT-MACARY *et al.*, 2009. Présentation du projet d'avenir de l'unité propre de recherche Risque environnemental lié au recyclage. Document d'évaluation remis à l'AERES, CIRAD, 23 p.
- SALON S. , 1992 - Typologie des élevages bovins, île de la Réunion 1991/1992. CIRAD EMVT Réunion, St Pierre, 16p.
- SIMON J.C., LE CORRE L., 1992. Le bilan apparent de l'azote à l'échelle de l'exploitation, méthodologie, exemples de résultats. *Fourrages*, 129 : 79-94.
- SIMON J.C., PEYRAUD J.L., DECAU M.L., DELABY L., VERTES F., DELAGARDE R., 1997, Gestion de l'azote dans les systèmes prairiaux pâturés permanents ou de longue durée. In: Maîtrise de l'azote dans les agrosystèmes, INRA, 19-20 nov. 1996, Reims, 201-216.
- SOULIE J.-C., 2001. Vers une approche multi-environnements pour les agents. Thèse de doctorat, Université de la Réunion.
- STEVENS R.J., LOGAN H.J., 1987. Determination of the volatilization of ammonia from surface-applied cattle slurry by the micrometeorological mass balance method. *Journal of Agricultural Science*, 109:205-207.
- SUCHMAN L., 1987. Plans and Situated Actions : The Problem of Human-Machine Communication, Cambridge University Press, Cambridge, MA, USA.
- THEPOT J., 1995. La modélisation en sciences de gestion ou l'irruption du tiers. *Revue Française de Gestion*, 102 : 66-70.
- THOMPSON R.B, PAIN B.F., LOCKYER D.R., 1990. Ammonia volatilization from cattle slurry following surface application to grassland. I. Influence of mechanical separation, changes in chemical composition during volatilization and the presence of the grass sward. *Plant and Soil*, 125:109-117.
- THORNTON P., HERRERO M., 2001. Integrated crop-livestock simulation models for scenario analysis and impact assessment, *Agricultural Systems*, 70 :581-602.
- TOMMASINO L., 1999. Choix et couplage de modèles du système sol-plante pour l'aide à la gestion des effluents d'élevage à la Réunion. Mémoire de DAA Génie de l'Environnement (Sol et aménagement), ENSAR, CIRAD, Rennes, 52 p. ; ce modèle n'a pas été validé, faute d'un référentiel suffisant sur le fonctionnement des systèmes biophysiques dans les conditions de la Réunion.
- VAN DER WERF H.M.G., PETIT J., 2002 Evaluation of the environmental impact of agriculture at the farm level : a comparison and analysis of 12 indicator-based methods.. *Agriculture, Ecosystems and Environment* : 93 (1), p.131-145.
- VAN HORN H.H., NEWTON G.L., KUNKLE W.E., 1996. Ruminant nutrition from an environmental perspective : factors affecting whole-farm nutrient balance. *Journal of animal science*, 74, 3082-3102.
- VAN SOEST, P.J., 1963. Use of detergents in the analysis of fibrous feeds. II – A rapid method for the determination of fibre and lignin. *J. Assoc. off. Anal. Chem.* 46, 829-835.
- VAYSSIERES J., 2004. L'appréhension des pratiques décisionnelles d'éleveurs par enquêtes-immersion : cas des activités à l'origine de flux d'azote en exploitations bovines laitières à la Réunion. Mémoire de DEA EMTS, INA-PG, Paris, 49 pp.
- VAYSSIERES J., BOCQUIER F., LECOMTE P., 2009. GAMEDE: A global activity model for evaluating the sustainability of dairy enterprises. Part II - Interactive simulation of various management strategies with diverse stakeholders. *Agricultural Systems* 101(3), p. 139-151.
- VAYSSIÈRES J., KERDONCUFF M., LECOMTE P., GIRARD N., MOULIN C.H., 2007. Farmers participation in designing a Whole Farm Model. In: Farming Systems Design 2007, International Symposium on "Methodologies for integrated analysis of farm production systems", 10-12 September, Catania, Italy, Vol. 2, Field-farm scale design and improvement, pp. 237-238.
- VAYSSIERES J., LECOMTE P., GUERRIN F., BOCQUIER F., VERDET C., 2006. Explaining the diversity of environmental performances according to a typology of farming practices combinations: the case of the dairy cattle breeding in Reunion

- Island. In: RAMIRAN 2006, 12th International Conference on "Technology for recycling of manure and organic residues in a whole-farm perspective", 11-13 September, Aarhus, Denmark, pp. 57-60.
- VEOLIA Eau, CIRAD, 2010. Convention pour la valorisation agricole de produits à base de compost de boues ou de boues séchées de la station d'épuration du Grand Prado. Document confidentiel, St Denis de la Réunion, 12 p.
- VIARD G., 2000. Mise à l'épreuve d'un modèle d'aide à la gestion des effluents d'élevage ; validation et potentialités d'aide à la décision en agriculture. Mémoire DAA Sciences animales, INA-PG, CIRAD, Paris, 68 p.
- VIMEUX L., 1998. La gestion de la matière organique dans les exploitations en diversification maraîchères des Hauts de l'Ouest de l'île de la Réunion. Mémoire de fin d'étude, Isab, Beauvais, 61 p.
- WILSON J.D., SHUM W.K.N., 1992. A re-examination of the integrated horizontal flux method for estimating volatilization from circular plots. *Agricultural Forest and Meteorology* 57, 281–295.
- ZAYTOON J., 2001. Systèmes dynamiques hybrides. Hermès Sciences Publications, Paris.
- ZIEGLER D., HEDUIT M. (1991). Engrais de ferme - Valeur fertilisante, gestion, environnement. Document technique ITP, ITEB, ITCF, Paris, 35 p.

Index des sigles, acronymes et abréviations

ACTA : Association de Coordination des Techniques Agricoles

ACV : Analyse du Cycle de Vie

ADEME Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie

AERES : Agence d'Evaluation de la Recherche et de l'Enseignement Supérieur

ANR : Agence Nationale de la Recherche –

APPROZUT : Modèle de simulation de l’approvisionnement d’unités de traitement

ATP : Action Thématique Programmée

BIA : Biométrie et Intelligence Artificielle

BIOMAS : Modèle multi-agents pour l’aide à la gestion de biomasse agricole

CA : Cultures Annuelles

CAS : Productivité durable des systèmes canniens et fonctionnement des exploitations

CASDAR : Compte d'affectation spécial pour le développement agricole et rural

CEEMAT : Centre d'Etude et d'Expérimentation en Machinisme Agricole et Technologie agro-alimentaire

CEMAGREF : Institut de recherche en sciences et technologies pour l'environnement

CIEEL : Conduite intégrée des exploitations et des filières d'élevage

CIFRE : Convention Industrielle de Formation par la REcherche

CIRAD : Centre de coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement

COMET : Collective management of effluents on a territory scale

COMOD (collectif) : Companion Modelling

CORDET : Commission d’Orientation des Recherches dans les Dom et Tom

CORPEN : Comité d’ORientation pour des Pratiques agricoles respectueuses de l’ENvironnement, Ministère de l’écologie du développement et de l’aménagement durable

E3P : Animal production intensification in Vietnam and environmental protection - VN/Asia-ProEco/OO2(91211).

EA : Environnement Agronomie

ECODEFI : Projet ECOconception et Développement de méthodologies de Fabrication Innovante de machines d’épandage

ECOTECH : Programme Ecotechnologies et Développement

ENVAM : Campus numérique environnement et aménagement

FASSET : Farm ASSEssment Tool

GAMEDE : Global activity model for evaluating the sustainability of dairy enterprises

GERT : Aide à la gestion concertée des ressources et des territoires en milieu rural

GIE : Groupement d’Intérêt Economique

GIS : Groupement d’Intérêt Scientifique

GREEN : Gestion des ressources renouvelables et environnement

IFSM : Integrated Farm Systems Model

INA-PG : Institut National Agronomique Paris-Grignon

INRA : Institut National de la Recherche Agronomique

INSA : Institut National des Sciences Appliquées

IRD : Institut de Recherche pour le Développement

IREMIA, Institut de Recherche en Mathématiques et Informatique appliquées, université de la Réunion

ISARD : Projet Intensification des Systèmes de production Agricole par le Recyclage des Déchets

ITEB : Institut Technique de l'Elevage Bovin, devenu Institut de l'Elevage (IE)

LIM : Laboratoire d'Informatique et de Mathématiques (ex IREMIA), université de la Réunion

MACSIZUT : Modèle d'aide au choix par simulation d'unités de traitement

MAGMA : Modèle d'aide à la gestion des matières organiques en agriculture
MELODIE : Modélisation de l'exploitation d'élevage en langage objet pour le diagnostic des impacts environnementaux
MEXICO : Méthodes d'EXploration Informatique de modèles Complexes
PADD : Programme Agriculture et Développement Durable –
PADEF : Pôle Agriculture Durable Environnement et Forêt
PILMO : Pilotage des apports de matières organiques et risques environnementaux
PRO : Produits Résiduaire Organiques
RECORD : Plateforme de modélisation et de simulation des agro-systèmes ; <http://www4.inra.fr/record>
SAD : Sciences pour l'Action et le Développement
SAR : Systèmes Agro-alimentaires et Ruraux
SAS : Sol Agro&hydro système Spatialisation
SAU : Surface agricole utilisée
SOERE : Système d'Observation, d'Etudes et de Recherches en Environnement
SPA/DD : Projet Systèmes de Production Animale et Développement Durable
STAL : Modèle de simulation de la transformation de l'azote du lisier
STRA : Programme écoSystèmes, Territoires, Ressources vivantes et Agricultures
TERA : Territoires Espace Ressources Acteurs
UGB : Unité Gros Bétail
UVED : Université virtuelle environnement et développement durable
VOLT'AIR : Modèle simulant la volatilisation de l'ammoniac après apport d'azote sur les cultures

Liste des tableaux et figures

p.

| | |
|---|-----------|
| Tableau 1. Teneurs en matière sèche et en azote et dégradabilité enzymatique avant et après traitement pour la paille traitée dans la balle avec 4,4% urée kg ⁻¹ MS (B5), sur la meule avec 6% urée kg ⁻¹ MS (S6) et 8% urée kg ⁻¹ MS (S8). | 43 |
| Tableau 2. Variables prises en compte dans les analyses en composantes principales (ACP). | 53 |
| Tableau 3. Facteur d'émissions et facteurs de correction, utilisés dans le module « bâtiments-stockage-traitement » du modèle MELODIE, pour prédire les émissions gazeuses et les pertes de matières (MS, N) et d'eau du tas lors du compostage de fumier de porc. | 77 |
| Figure 1. Représentation globale d'une exploitation d'élevage bovin laitier par un diagramme de flux de matières azotées. | 36 |
| Figure 2. Complémentarité des approches analytique et systémique pour élaborer des modèles de gestion de flux de MO, construits à partir de données et de connaissances issues de l'analyse des pratiques agricoles et de références sur les systèmes biophysiques, dans le but de proposer de nouvelles stratégies de gestion aux acteurs agricoles. | 37 |
| Figure 3. Présentation de la démarche de recherche, des thèmes de recherche et des méthodes mises en œuvre concernant l'étude de la conservation des fourrages en balles enrubannées. | 39 |
| Figure 4. Influence de l'apport de mélasse sur l'acidification d'un ensilage d'un mélange de dactyle – Ray-Grass-Hybride – kikuyu, récolté au stade feuillu avec une teneur en MS de 40 %. | 40 |
| Figure 5. Description conceptuelle de la gestion du système fourrager. | 46 |
| Figure 6. Localisation des enquêtes sur la carte des principales régions agricoles de l'île. | 49 |
| Figure 7. Principaux flux d'azote observés dans une exploitation porcine de la province de Thaï Binh. Les terres agricoles sont souvent assez éloignées (plusieurs km) des terres de l'habitation qui comprend les élevages équipés parfois d'un digesteur méthanique, un étang et un jardin. | 50 |
| Figure 8. Identification des principaux risques pour l'environnement, estimés par l'excédent du bilan azoté (kg N ha ⁻¹ SFP), et localisés sur la gestion des stocks d'effluents et de la SFP : surface fourragère principale. | 52 |
| Figure 9. Classification des exploitations porcines enquêtées (identifiant numérique) de la province de Thaï Binh et risque de pollution potentiel associé. | 54 |

| | |
|---|-----------|
| Figure 10. Principe et dispositif de la méthode de mesure de flux d'ammoniac par bilan de masse. | 59 |
| Figure 11. Schématisation de la problématique des transferts de MO vue au niveau de l'exploitation agricole (schéma du haut) ou du territoire de la Réunion (schéma du bas). | 66 |
| Figure 12. Démarche MAFATE : méthodologie suivie pour la construction et l'utilisation des modèles de simulation de la gestion des effluents d'élevage. | 70 |
| Figure 13. Problèmes posés par l'introduction, au sein de modèles de gestion de flux, de variables caractérisant les systèmes biophysiques ou les pratiques de gestion ; trois options sont possibles et combinables : couplage de modèles, extraction d'équations, interfaçage avec un référentiel biotechnique ; les différentes étapes (1) à (4) font références à la figure 12. | 73 |
| Figure 14. Fonctionnement général d'une simulation avec MELODIE. | 74 |
| Figure 15. Facteurs d'émissions au stockage et à l'épandage (en % des quantités initiales produites) pour les exploitations d'élevage (n=11) et les prêteurs de terre (n=11) ; l'indicateur N-NO ₃ correspond à un risque de pollution (N en excès) et l'indicateur N-engrais considère l'achat d'engrais nécessaire pour compenser le besoin des cultures non pourvu par le lisier. | 83 |
| Figure 16. Représentation schématique des thèmes scientifiques proposés dans le projet de l'unité Recyclage et risque. | 94 |

Annexes : sélection de publications

- [Ai 1] **PAILLAT J.-M.**, GAILLARD F., 2001. Air-tightness of wrapped bales and resistance of stretch film under tropical and temperate conditions. *J. Agric. Engng Res.* 79 (1), 15-22.
- [Ai 3] **PAILLAT J.-M.**, ROBIN P., HASSOUNA M., LETERME P., 2005. Predicting ammonia and carbon dioxide emissions from carbon & nitrogen biodegradability during animal waste composting. *Atmospheric Environment* 39, 6833-6842.
- [Ai 4] AUBRY C., **PAILLAT J.M.**, GUERRIN F., 2006. A conceptual model of animal waste management in the Reunion Island. *Agricultural Systems* 88 (2-3), 294-315.
- [Ai 8] LOPEZ-RIDAURA S., VAN DER WERF H.M.G., **PAILLAT J.-M.**, 2008. Environmental evaluation of transfer and treatment of excess pig slurry by life cycle assessment. *Journal of Environmental Management* 90, 1296-1304. Doi:10.1016/j.envman.2008.07.008.
- [Ai 11] VAYSSIERES J., GUERRIN F., **PAILLAT J.-M.**, LECOMTE P., 2009. GAMEDE: A Global Activity Model for Evaluating the Sustainability of Dairy Enterprises. Part I: Whole-farm dynamic model. *Agricultural Systems*, vol.101: n°3 p. 128-138. Doi:10.1016/j.agsy.2009.05.001.
- [Ai 14] SANSOULET J., GÉNERMONT S., MORVAN T., SAINT MACARY H., **PAILLAT J.-M.**, Combined effect of sugarcane trash mulch slurry properties and tropical climatic conditions on ammoniac volatilization after pig slurry application. *Atmospheric Environment* (version révisée soumise 01-2011).
- [Ac18] **PAILLAT J.-M.**, LOPEZ-RIDAURA S., GUERRIN F., VAN DER WERF H.M.G., MEDOC J.-M., MORVAN T., LETERME P., SAINT MACARY H., 2010. Les voies organisationnelles à l'échelle d'un territoire : cas des unités de traitement et des plans d'épandage collectifs. *Colloques de l'Académie Agriculture de France*, 2010 (1) : 119-134.
- [Ci36] OUDART D., ROBIN P., HASSOUNA M., **PAILLAT J.-M.**, 2010. Predicting the effect of C and N biodegradability, humidity and porosity on ammonia emission during animal manure composting. In : *International Conference on Agricultural Engineering 2010 (AgEng 2010)*, September 6-8, 2010, Clermont-Ferrand, France. s.l. : s.n., 8 p.. *International Conference on Agricultural Engineering 2010*, 2010-09-06/2010-09-08, Clermont-Ferrand, France.
- [Ca13] **PAILLAT J.-M.**, AUBRY C., MEDOC J.-M., 2003. Une typologie des systèmes de gestion des effluents d'élevage dans les exploitations de l'île de la Réunion. In Guerrin F., (ed.), Paillat J.M., (ed.) *Modélisation des flux de biomasse et des transferts de fertilité. Cas de la gestion des effluents d'élevage à l'île de la Réunion. Actes du séminaire.* [Cd-Rom]. Montpellier, France: Cirad. Séminaire de l'ATP 99/60, 2002/06/19-20, Montpellier, France.